



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje



ZAVRŠNI RAD

Bojan Igrec

Zagreb, 2012.



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje



**POSTUPAK UMJERAVANJA PRETVORNIKA TLAKA
VISOKOG RAZREDA TOČNOSTI
ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Bojan Igrac

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i navedenom literaturom i opremom Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta Strojstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Posebno zahvaljujem svojoj mentorici doc. dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec na stručnim savjetima i vodstvu kroz završni rad. Njezino nesebično uloženo vrijeme i stručni savjeti uvelike su doprinijeli krajnjoj kvaliteti ovoga rada.

Također zahvaljujem Alenu Jurišincu na uloženom trudu, podršci, usmjeravanju u radu te ugodnoj suradnji tijekom laboratorijskih mjerenja.

Htio bih zahvaliti i svojoj obitelji koja mi je bila velika podrška u dosadašnjem dijelu studija.

Bojan Igrec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bojan Igrec**

Mat. br.: 0035168498

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Postupak umjeravanja pretvornika tlaka visokog razreda točnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration procedure for pressure transducer of high accuracy class**

Opis zadatka:

Prema međunarodnim preporukama za umjeravanje mjerila tlaka sva mjerila deklariranog razreda točnosti $\leq 0,1$ umjeravaju se prema tzv. "A" postupku kojeg određuje veći broj ponavljanja i umjernih točaka od "B" i "C" postupaka.

U ovom radu potrebno je:

- Dati pregled normi i uputa za umjeravanje mjerila tlaka.
- Provesti umjeravanje barem jednog mjerila tipa "A" na etalonskoj tlačnoj vagi u Laboratoriju za procesna mjerenja.
- Opisati postupak umjeravanja, korekcije i procjenu mjerne nesigurnosti.
- Napraviti predloške i računalnu podršku za provedbu ovakvog tipa umjeravanja.
- Priložiti primjer umjeravanja s pripadajućim mjernim nesigurnostima.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. travnja 2012.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Rok predaje rada:

2. rok: 6. srpnja 2012.

3. rok: 14. rujna 2012.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok: 9., 10. i 11. srpnja 2012.

3. rok: 19., 20. i 21. rujna 2012.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. EURAMET	3
1.2. Tlak i mjerenje tlaka	4
2. TEORIJSKE OSNOVE	9
2.1. Općenito o mjernoj nesigurnosti	9
2.1.1. Metode procjene mjerne nesigurnosti	11
2.1.2. Pogreške nasuprot nesigurnosti:	21
2.2. Općenito o umjeravanju	25
2.3. Tlačne vage	28
2.3.1. Princip rada tlačne vage	28
2.3.2. Vrste tlačnih vaga	30
2.3.3. Određivanje efektivnog tlaka p_e kod uljnih tlačnih vaga:.....	32
3. POSTUPAK UMJERAVANJA PRETVORNIKA TLAKA VISOKOG RAZREDA TOČNOSTI.....	35
3.1. Metode umjeravanja.....	36
3.1.1. Tip A	38
3.1.2. Tip B	39
3.1.3. Tip C	40
3.2. Postupak proračuna	40
3.2.1. Procedura	43
3.2.2. Umjeravanje pretvornika tlaka i kovnih manometara s Bourdonovom cijevi	46
3.2.2.1. Model procjene	46
3.2.2.2. Analiza nesigurnosti.....	48
3.2.2.3. Određivanje relevantnih parametara za analizu nesigurnosti	50
4. LABORATORIJSKA MJERENJA I PRIMJERI UMJERAVANJA.....	53
4.1. Laboratorijska mjerenja	54
4.2. Primjeri umjeravanja i računalna podrška proračuna.....	55
4.2.1. Primjer 1.....	56
4.2.2. Primjer 2.....	62
5. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA.....	71

POPIS SLIKA

Slika 1:	Nesređeno gibanje čestica fluida (lijevo i sredina) i vizualizacija sile na površinu (desno)	4
Slika 2:	Trajektorija čestice kod Brownova gibanja (lijevo), Daniel Bernoulli (desno)	6
Slika 3:	Načini mjerenja tlaka.....	8
Slika 4:	Skalarni odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine (lijevo), vektorski odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine (desno).....	11
Slika 5:	Gaussova ili normalna razdioba	13
Slika 6:	Pravokutna ili jednolika razdioba.....	13
Slika 7:	Trokutasta razdioba	14
Slika 8:	Prikaz nivoa pouzdanosti uz $k=1$	16
Slika 9:	Prikaz nivoa pouzdanosti uz $k=2$	16
Slika 10:	Prikaz nivoa pouzdanosti uz $k=3$	16
Slika 11:	Valjak radiusa r i visine h	17
Slika 12:	Shematski prikaz procjene mjerne nesigurnosti MCS metodom	20
Slika 13:	Prikaz netočnosti mjernog rezultata	23
Slika 14:	Prikaz ponovljivosti i nepreciznosti mjernog rezultata	23
Slika 15:	Prikaz razlike između preciznosti i točnosti.....	24
Slika 16:	Prikaz obnovljivosti mjernog rezultata.....	24
Slika 17:	Shema umjeravanja	26
Slika 18:	Shema lanca sljedivosti	27
Slika 19:	Sljedivost etalona i mjerila	28
Slika 20:	Osnovne konfiguracije tlačne vage	30
Slika 21:	Dijagram umjeravanja (tip A)	38
Slika 22:	Dijagram umjeravanja (tip A, detalj Z)	38
Slika 23:	Dijagram umjeravanja (tip A) – dodatak.....	39
Slika 24:	Dijagram umjeravanja (tip B).....	39
Slika 25:	Dijagram umjeravanja (tip C).....	40
Slika 26:	Mjerna linija u LPM-u.....	54
Slika 27:	Dijagram odstupanja i proširene mjerne nesigurnosti (primjer 1)	61
Slika 28:	Dijagram pretvaranja električnog impulsa u tlak	63
Slika 29:	Dijagram odstupanja i proširene mjerne nesigurnosti (primjer 2)	69

POPIS TABLICA

Tablica 1: Izmjera radijusa r i visine h valjka (mjerna nesigurnost tipa A)	18
Tablica 2: Mjerna nesigurnost izmjera radiusa r (mjerna nesigurnost tipa B)	18
Tablica 3: Mjerna nesigurnost izmjera visine h (mjerna nesigurnost tipa B).....	18
Tablica 4: Sastavljena i proširena mjerna nesigurnost mjerenja volumena valjka V (kombinacija mjerne nesigurnosti tipa A i tipa B)	19
Tablica 5: Tipovi metoda umjeravanja s obzirom na razred točnosti umjeravanog instrumenta	37
Tablica 6: Određivanje mjerne nesigurnosti.....	44
Tablica 7: Ostale vrste raspodjele kod B tipa određivanja nesigurnosti	46
Tablica 8: Analiza nesigurnosti kod umjeravanja kovnih manometara s Bourdonovim cijevima i pretvornika tlaka	48
Tablica 9: Proračun nesigurnosti	49
Tablica 10: Analiza nesigurnosti kod umjeravanja pretvornika tlaka – dodatak	49
Tablica 11: Mjerne vrijednosti	52
Tablica 12: Rezultati mjerenja.....	55
Tablica 13: Tablica pretvaranja električnog impulsa u tlak	63

POPIS OZNAKA

A_0	[m ²]	-efektivna površina pri atmosferskom tlaku
A_e	[m ²]	-efektivna površina (pri efektivnom tlaku)
c	[m]	-opseg klipa
c_i	[-]	-koeficijent osjetljivosti
F	[N]	- sila
g	[m/s ²]	- gravitacijsko ubrzanje
h	[mm]	- razlika u visini u odnosu na referentni položaj
k	[-]	- faktor pokrivanja
m_i	[kg]	- masa utega
P	[Pa]	- tlak
p_{abs}	[Pa]	- apsolutni tlak
p_e	[Pa]	- efektivni tlak
p_j	[Pa]	- tlak u košuljici cilindra tlačne vage
p_{ok}	[Pa]	- okolišni tlak
t	[°C]	- temperatura
t_{ok}	[°C]	- temperatura okoliša
u	[bar]	-standardna nesugurnost
U	[bar]	-proširena nesigurnost
v	[m ³]	- potopljeni volumen klipa
α_c	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperature ekspanzije cilindra
α_k	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperature ekspanzije klipa
Γ	[mN/m]	- površinska napetost
ε	[-]	- deformacija
θ	[-]	- kut otklona klipa od vertikale
λ	[MPa ⁻¹]	- koeficijent distorzije
ρ_a	[kg/m ³]	- gustoća okolišnog zraka
ρ_f	[kg/m ³]	- gustoća radnog fluida
ρ_{mi}	[kg/m ³]	- gustoća utega
σ	[N/mm ²]	- naprezanje
S	[kJ/K]	-entropija
s	[kJ/kgK]	-specifična entropija
R	[J/kmolK]	-opća plinska konstanta
d	[m]	-promjer
$s(x_i)$	[bar]	-standardno odstupanje
r	[m]	-radius
a	[-]	-polu-interval razdiobe

u_c	[bar]	-sastavljena mjerna nesigurnost
\bar{x}_l	[bar]	-srednja vrijednost veličine
V	[m ³]	-volumen
N	[-]	- broj ulaznih veličina koje određuju izalanu
n	[-]	-broj ponovljenih mjerenja
Y	[bar]	-izlazna veličina
X	[bar]	-ulazna veličina
δX	[bar]	-nepoznato mjerno odstupanje
E(...)	[bar]	-očekivana vrijednost
P	[-]	-vjerojatnost
V	[V]	-napon
r	[bar]	-rezolucija
f_0	[bar]	-nulto odstupanje
b'	[bar]	-ponovljivost
b	[bar]	-obnovljivost
h	[bar]	-histereza
U'	[bar]	-širina (interval) greške
Δp	[bar]	-sustavno mjerno odstupanje veličine tlaka
j	[-]	-broj mjerne točke
m	[-]	-broj mjernog reda (serije)
n	[-]	-broj mjernog ciklusa

SAŽETAK

U radu je prikazan postupak umjeravanja mjerila tlaka po preporuci DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges) s posebnim naglaskom na umjeravanje pretvornika tlaka visokog razreda točnosti po A tipu procedure umjeravanja.

U sklopu rada provedeno je umjeravanje pretvornika tlaka (PDCR 2200 – 1939) indikacije do 350 bara na etalonskoj tlačnoj vagi "Pressurements" (TLVAG-08) u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a dobiveni rezultati obrađeni su u računalnom programu Excel.

U uvodnom dijelu rada prikazan je općeniti postupak određivanja mjerne nesigurnosti ISO-GUM metodom te je, također u sklopu uvodnog dijela, riješen jedan općeniti primjer procjene mjerne nesigurnosti.

1. UVOD

U današnje vrijeme u Europi i svijetu sustavno mjerenje s poznatim stupnjevima nesigurnosti jedan je od temelja industrijskog upravljanja kakvoćom i, općenito govoreći, u većini suvremenih industrija troškovi mjerenja čine 10 % – 15 % troškova proizvodnje. Današnja znanost potpuno je ovisna o mjerenju. Dostupnost mjerne opreme i mogućnost njezine uporabe bitna je da znanstvenici mogu objektivno dokumentirati rezultate koje dobivaju. Znanost o mjerenju i njegovim primjenama - metrologija (mjeriteljstvo) - vjerojatno je najstarija znanost u svijetu te je znanje o tome kako se ona primjenjuje temeljna potreba u praktično svim znanstveno utemeljenim zanimanjima.

Mjeriteljstvo je kao znanstvena disciplina nastalo iz veoma praktičnih razloga. To je temeljna potreba da se nešto može izmjeriti. Ispravnim se mjerama od početaka ljudske civilizacije priznavala posebna društvena važnost te su se one propisivale s najvišim autoritetom vladara. Vladari su utvrđivali mjere (etalone) iz jednostavnog razloga kako bi se mogla odvijati trgovina i gospodarske djelatnosti.

Mjeriteljstvo ima tri glavna zadatka:

1. definiranje međunarodno prihvaćenih mjernih jedinica
2. ostvarenje mjernih jedinica znanstvenim metodama
3. utvrđivanje lanca sljedivosti pri dokumentiranju točnosti mjerenja

Mjeriteljstvo se općenito dijeli na:

- znanstveno
- industrijsko
- zakonsko
- temeljno

Znanstveno mjeriteljstvo se bavi organizacijom i razvojem mjernih etalona i njihovim čuvanjem (najviša razina). Prema BIPM-u¹ dijeli se u tehnička područja: masa, elektricitet, duljina, vrijeme i frekvencija, termometrija, ionizacijsko zračenje i radioaktivnost, fotometrija i radiometrija, protok, akustika i količina tvari. Industrijsko mjeriteljstvo osigurava prikladno

¹ *Međunarodni ured za utege i mjere (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)*

funkcioniranje mjerila koja se upotrebljavaju u industriji i u procesima proizvodnje. Zakonskom mjeriteljstvu glavni je cilj zaštita građana od posljedica pogrešnih mjerenja (u službenim i trgovačkim poslovima, u radnom okolišu, u zaštiti na radu i sigurnosti), dok je tehnička funkcija zakonskog mjeriteljstva da mjerila trebaju jamčiti ispravne mjerne rezultate:

- u radnim uvjetima
- u cjelokupnom razdoblju uporabe
- u granicama danih dopuštenih pogrešaka

Za temeljno mjeriteljstvo ne postoji međunarodno prihvaćena definicija, ali ona označuje najvišu razinu točnosti u danome području. Temeljno se mjeriteljstvo može, prema tome, opisati kao najviša grana znanstvenog mjeriteljstva.

Mjeriteljske djelatnosti, ispitivanja i mjerenja, veoma su bitni ulazni elementi za funkcioniranje kakvoće u industrijskim djelatnostima. Za to je potrebna sljedivost, koja postaje jednako važna kao i samo mjerenje. Priznavanje mjeriteljske mjerodavnosti na svakoj razini lanca sljedivosti može se uspostaviti sporazumima i dogovorima o međusobnome priznavanju. Umjeravanje mjerila temeljno je oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti, a obuhvaća određivanje mjeriteljskih značajki mjerila. Ono se postiže izravnom usporedbom s etalonima. Na temelju tih podataka korisnik može odlučiti je li mjerilo prikladno za dotičnu primjenu.

Tri su glavna razloga za umjeravanje mjerila:

1. da se osigura da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima.
2. da se odredi točnost očitavanja mjerila.
3. da se utvrdi pouzdanost mjerila, tj. može li mu se vjerovati.

Umjeravanjem mjerila postiže se sljedeće:

- Rezultat umjeravanja omogućuje pridruživanje vrijednosti mjerenih veličina pokazivanjima ili određivanje ispravaka pokazivanja.
- Umjeravanjem se također mogu određivati i druga mjeriteljska svojstva kao što su npr. djelovanje utjecajnih veličina.
- Rezultat umjeravanja bilježi se u dokumentu koji se naziva potvrda o umjeravanju ili izvještaj o umjeravanju, a (u mnogim slučajevima) na umjerena mjerila stavlja se i naljepnica.

Temeljno se mjeriteljstvo, slično kao i znanstveno, dijeli na područja: masa, elektricitet, duljina, vrijeme i frekvencija, termometrija, ionizantno zračenje i radioaktivnost, fotometrija i radiometrija, protok, akustika, količina tvari i interdisciplinarna metrologija. Tih 11 područja definirao je EURAMET.

1.1. EURAMET

EURAMET (European Association of National Metrology Institutes) je glavna organizacija za mjeriteljstvo u Europi i interesna strana Europskoga povjerenstva, a također upravlja projektima EU koji su od interesa za zajedničko tržište. Suradnja između europskih mjeriteljskih ustanova započela je 1983. godine. Sada su 23 zemlje članice, a nekoliko je zemalja u procesu podnošenja zahtjeva za članstvo. Temelj za suradnju vođenje je na nižoj razini projekata koji se odnose na istraživanje, međulaboratorijske usporedbe i proučavanje sljedivosti. Projektima upravljaju tzv. skupine izvjestitelja s jednim članom iz svake zemlje. Oni čine temelj za istovrijednost između nacionalnih mjeriteljskih ustanova i za sljedivost u Europi. EURAMET je regionalna organizacija u CIML-ovu (International Committee of Legal Metrology) višestranom sporazumu o priznavanju nacionalnih mjernih etalona.

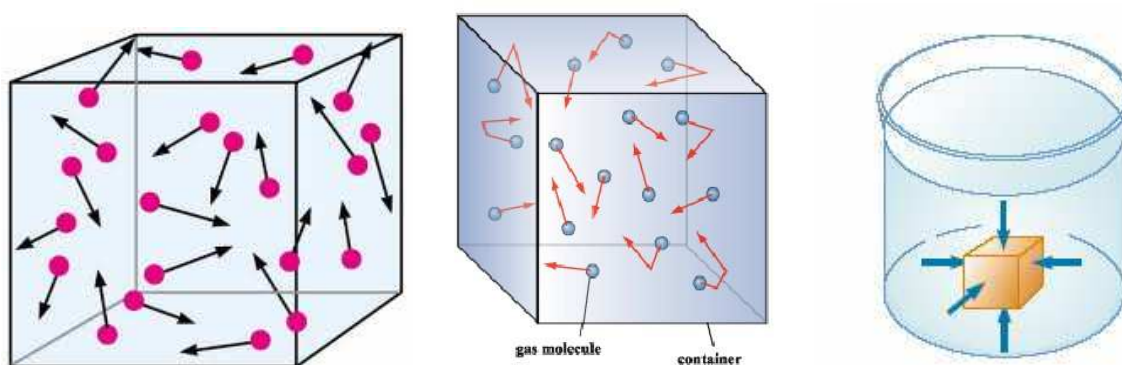
1.2. Tlak i mjerenje tlaka

Tlak² se u tehničkom smislu definira kao normalna sila koja djeluje na jedinicu površine, odnosno tlak je omjer sile i površine na koju ta sila djeluje okomito. U fluidu u mirovanju sile su okomite na površinu s kojom je fluid u kontaktu → sile pritiska.

$$p = \frac{dF}{dA} \approx \frac{F}{A} \text{ [Pa]} \text{ ili } \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Gornja jednadžba napisana je za ravnotežni fluid prema hipotezi kontinuuma gdje je diferencijal površine dA najmanja površina ploštine za koju su efekti fluida isti kao i u cijelom kontinuumu, a dF je normalna (okomita) komponenta sile koja djeluje na tu površinu.

Bez obzira na to što gornja definicija tlaka egzaktno opisuje fenomen tlaka i omogućuje tehničku i praktičnu primjenu, ne govori ništa o prirodi fenomena. Danas se fenomen tlaka fluida (plina ili kapljevine) objašnjava čestičnom strukturom materije. Naime, kako se čestice fluida nesređeno gibaju (termičko gibanje), tako se elastično sudaraju sa stijenkom (slika 1) i s njom izmjenjuju neki impuls sile. Izmijenjeni impuls jednak je promjeni količine gibanja čestice plina (Hamiltonov formalizam). Takvo uzastopno sudaranje ogromnog broja sitnih čestica³ o stijenku na makrorazini ima kao posljedicu osjećaj sile na površinu stijenke.



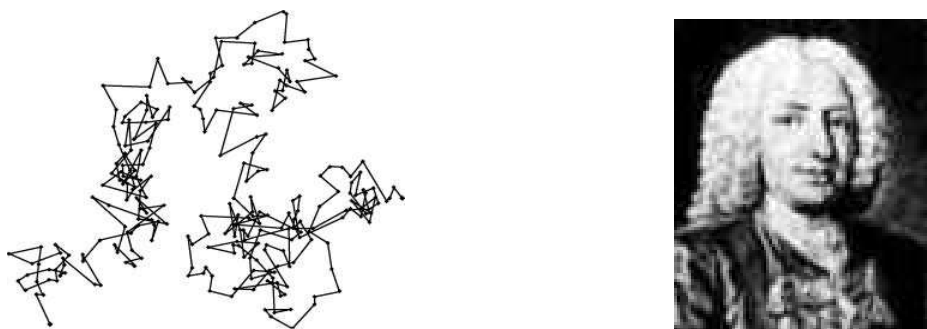
Slika 1: Nesređeno gibanje čestica fluida (lijevo i sredina) i vizualizacija sile na površinu (desno)

² Tlak (eng. pressure, njem. druck)

³ Pod pojmom čestice ovdje se prvenstveno smatraju atomi i molekule fluida od kojih kreće kinetička teorija plinova koja je teorijski došla do povezanosti tlaka s uzastopnim sudarima molekula o stijenku, premda čestica ima i puno manjih od atoma i molekula (primjerice, svaki se atom sastoji od manjih čestica, elektrona i jezgre koja se sastoji od protona i neutrona, ali i plina π -mezona koji ih drže zajedno na okupu, a protoni, neutroni i π -mezoni se sastoje od još manjih dijelova, kvarkova te gluona, koji drže te kvarkove neraskidivim vezama). Jedan potpuni (mehanički) opis plina trebao bi uzeti u obzir i gibanje svih tih manjih čestica, što danas nije moguće jer ne postoje računala koja bi mogla izračunati tako veliki broj jednadžbi, a i nisu poznati početni uvjeti koji bi imali velik utjecaj na rezultat. Problem broja čestica javlja se i u klasičnoj statističkoj fizici, a razriješen je tek u kvantnoj statističkoj fizici.

S druge strane, kada bi se ta površina smanjivala i kada bi se smanjivanjem približila dimenzijama redova veličina dimenzija molekula, vidjelo bi se da ta sila nije stalna i da se nepredvidivo mijenja kako nasumično o nju udaraju čestice (molekule). Do tog otkrića došao je škotski botaničar Robert Brown (1773. – 1858.), a fenomen se naziva Brownovo gibanje.

Brown je godine 1827. na svom studijskom putovanju uočio pojavu nesređenog gibanja čestica neke tvari koja je otopljena u vodi (tako da tvori suspenziju). To gibanje pratio je mikroskopom, a koristio je zrnce peluda uronjeno u vodu. Prateći putanju peludnog praha, dobio je nesređenu putanju kao na slici 2. Početno Brown je pokušao objasniti gibanje životnom klicom (*vis vitalis*) u peludu, ali kad je iskušao pokus i s vrlo starim, sasušanim peludom, dobio je jednako nesređeno gibanje. Gibanje je bilo nesređeno kada je pratio i česticu koja je bila podrijetlom od nežive tvari, time je odbacio *vis vitalis* kao razlog takvog gibanja. Dugo su se vremena brojni kemičari i fizičari bavili Brownovim gibanjem i nastojali ga protumačiti. Prvo tumačenje tog gibanja dao je Albert Einstein (1879. – 1955.) u razdoblju od 1905. do 1908. u nekoliko svojih radova - dao je matematički model, koji se još naziva i nasumični šetač, i opisuje točnu teoriju Brownova gibanja (teoriju Brownova gibanja razvio je neovisno o Einsteinu i Marian Smoluchowski 1905. godine). Zanimljivo je da Einstein u svojim radovima nije polazio od Brownova gibanja, nego je pretpostavio čestičnu (molekularnu) građu fluida te je dobio da se neka sitna čestica u toj tekućini treba gibati kao što je Brown opazio. Time se nesređeno gibanje neke čestice suspendirane u tekućini (tj. Brownovo gibanje) tumači kao posljedica niza srazova molekula tekućine i strane čestice. Zbog veličine čestice, događa se da na jednom dijelu čestice udari više molekula negoli na drugom kraju. Tako molekule tekućine odbacuju suspendiranu česticu u smjeru većeg impulsa. U slučaju većih čestica gibanje se ne može uočiti jer je zbog veličine čestice (suspendirana čestica \gg molekula) približno jednak impuls u svim smjerovima te je resultantna sila na česticu jednaka nuli.



Slika 2: Trajektorija čestice kod Brownova gibanja (lijevo), Daniel Bernoulli (desno)

Drugi dokaz koji ide u prilog čestičnoj strukturi (atomarnosti tvari) dogodio se u 18. st. kada su kemičari eksperimentirali i uočili da se dani elementi vežu u novi kemijski spoj uvijek u istom omjeru masa, tzv. stalnost omjera, iz čega proizlaze Daltonov i Avogadrov zakon. Gornje činjenice, kao i mnogi drugi pokusi, dokazuju postojanost čestične strukture tvari i opravdavaju gornje objašnjenje fenomena tlaka te su prethodile poznatoj molekularno-kinetičkoj teoriji plinova s pomoću koje je teorijski izvedena veza tlaka temperature i količine tvari, ista ona relacija do koje se eksperimentalno može doći s pomoću Gay-Lussacova i Boyle-Mariotteova pokusa (zakona) kod idealnih plinova poznata pod nazivom jednačina stanja. Tlak se tada može izraziti:

$$p = \frac{T}{V} \cdot R \cdot n$$

Gdje su T apsolutna termodinamička temperatura [K], V volumen plina [m^3], R opća (molarna) plinska konstanta $R = 8314 \text{ [J/(kmolK)]}$, a n količina (množina) tvari [kmol].

Teško je reći tko je prvi domislio načelnu vezu između gibanja čestica plina i makroveličina kojima se stanje plina opisuje. Poznato je da su, oko stotinu godina prije intenzivnog empirijskog istraživanja u području termodinamike neki istraživači zastupali i iznosili kinetičku tezu. Godine 1738. Daniel Bernoulli (1700. – 1782.) prvi je predložio kinetičku teoriju plinova kada je Boyle-Mariotteov zakon izveo teorijski s pomoću kinetičkog modela plina. Njegov rad ostao je nezapažen sve do 19. stoljeća kada je počeo razvitak statističke fizike. Statističku mehaniku uglavnom su razvili njemački fizičar Rudolf Clausius (1822. – 1888.), škotski fizičar James C. Maxwell (1831. – 1879.), austrijski fizičar Ludwig E. Boltzmann (1844. – 1906.) i američki fizičar Josiah W. Gibbs (1839. – 1903.), koja je svojevrsni nastavak kinetičke teorije i koja statistički, putem teorije vjerojatnosti, opisuje i objašnjava termodinamiku i fenomene koje termodinamika uzima kao temeljne (iskustvene činjenice) jer nema za njih teorijsko objašnjenje (primjerice, uzrok tlaka fluida, toplinski

kapaciteti, termalna provodnost i termalni otpori, entropija⁴ te osnovno načelo da toplina uvijek prelazi s tijela više na tijelo niže temperature itd.).

U tehnici se s druge strane radi jednostavnosti i mogućnosti izračunavanja određenih veličina stanja i efekata koje one imaju na radnu opremu i dijelove strojeva (npr. kod tlaka fluida bitno je kakav on utjecaj ima na stijenku nekog strojnog dijela) koristi hipoteza kontinuuma. Kontinuum je matematički model koji pretpostavlja kontinuirano raspoređenu materiju po prostoru, tj. materija zadržava svoja fizikalna svojstva pri smanjivanju volumena u točku. Čestica kontinuuma (materijalna točka) ima infinitezimalno mali volumen dV koji još uvijek sadrži velik broj molekula i atoma, svaka čestica zauzima samo jednu točku prostora, a u jednoj točki prostora može se nalaziti samo jedna čestica kontinuuma. Hipoteza kontinuuma omogućuje primjenu integralnog i diferencijalnog računa.

Prema tom modelu pisana je i definicijska jednadžba tlaka

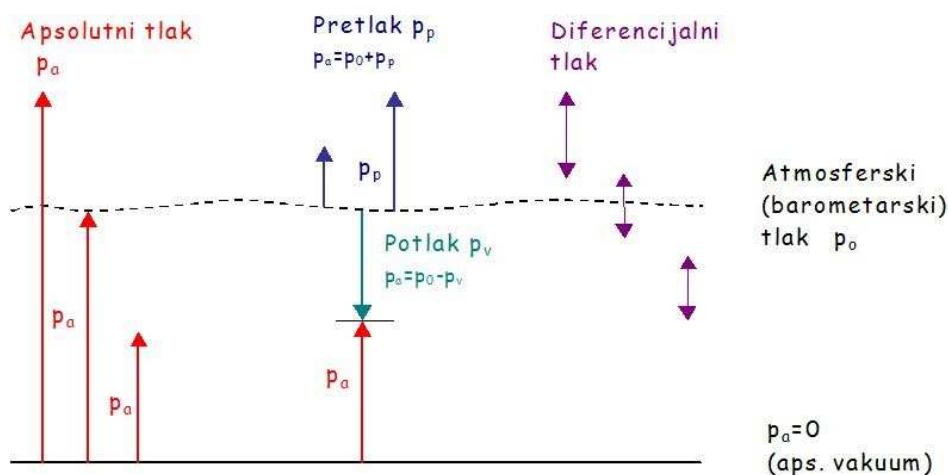
$$p = \frac{dF}{dA}$$

U kojoj je diferencijal površine dA površina koja odgovara površini čestice za koju su efekti fluida isti kao i u cijelom kontinuumu, tj. na tu površinu uzastopno udara velik broj molekula (jer se čestica kontinuuma sastoji od još dovoljno velikog broja molekula) da bi efekt tlaka bio kontinuirano vremenski isti kao i u ostatku kontinuuma, tj. konstantan.

⁴ Premda je entropija ($ds = \frac{dq}{T}$) jedna od veoma bitnih varijabli stanja (funkcija stanja, veličina stanja) u termodinamici, termodinamika je koristi i donosi zaključke s pomoću nje. Ovdje se promatra fenomen entropije bez pitanja što zaista entropija jest, tj. koji je dublji smisao predodžbe i poimanja fenomena entropije iz perspektive mnoštva čestica kada bi se entropija proučavala kao svrha sama sebi a da ju se ne proučava kao „alat“ kojim se objašnjavaju neki drugi fenomeni. Tako se termodinamika temelji na iskustvenim činjenicama i opažanjima, a entropija iz perspektive termodinamike na fenomenološkim iskazima drugog zakona termodinamike (Kelvinova, Planckova, Clausiusova formulacija drugog zakona termodinamike), zato se govori da je termodinamika fenomenološka znanost. S druge strane statistička fizika izvodi svoje zaključke i teoreme iz temeljnog postulata statističke fizike koji kaže da su sva dostupna stanja jednako vjerojatna te ulazi u povezanost strukture pojedine tvari s termodinamičkim svojstvima. Tako je poznat izraz za entropiju sustava za danu energiju E raspodijeljenu u njemu na razini atoma koji je Boltzmann izveo $S(E) = k_B \ln |\Omega(E)|$, gdje je k_B Boltzmannova konstanta, a $\Omega(E)$ broj dostupnih stanja koje sustav može imati za određenu energiju. Možemo reći da je najvjerojatnije makrostanje (to je stanje sustava određeno makroskopski mjerljivim varijablama stanja kao što su tlak, volumen, temperatura, gustoća...) ono koje se može manifestirati s najvećim brojem dostupnih mikrostanja (u kvantnoj statističkoj fizici brojem dostupnih kvantnih stanja); tako je toplinska ravnoteža ono makrostanje za koje postoji maksimalan broj dostupnih mikrostanja, odnosno stanje maksimalne entropije. Pod pojmom mikrostanja podrazumijeva se da je na razini atoma točno utvrđena jedna od raspodjela energije (E) na razna kvantna pobuđenja, a jedno te isto makrostanje može se ostvariti mnoštvom mikrostanja, tada je najvjerojatnije ono makrostanje koje se ostvaruje s najvećim brojem mikrostanja, tj. dostupnih stanja. Makrostanja koja se ostvaruju s manjim brojem dostupnih stanja nazivaju se lokalnim fluktuacijama i prema raspodjelama vjerojatnosti traju zanemarivo kratko, a vjerojatnost za njihovo ostvarenje je to manja što se više udaljavamo od ravnotežnog položaja, odnosno maksimalnog broja dostupnih stanja. Za sustav koji se nalazi u lokalnoj fluktuaciji kažemo još da se nalazi u stanju neravnoteže.

Mjerenje tlaka i vakuuma ima važnu ulogu u modernoj civilizaciji. Počevši od Industrijske revolucije koja se temeljila na strojevima pokretanim tlakom generiranim pri isparavanju kapljevite vode u paru pa sve do današnjih dana, potreba za što točnijim mjerenjima tlaka preko sve širih raspona neprestano se povećava. Primjene nalazimo u svim granama industrije kao npr. nuklearnoj, plinskoj, petrokemijskoj, biološkoj, farmaceutskoj, automobilskoj, meteorološkoj, poluvodičkoj, optičkoj, zrakoplovnoj, vojnoj, klimatizacijskoj, filtracijskoj i u svim kontroliranim procesima. Ispravnost i točnost mjerenja ključna je za trgovinu, učinkovitost, kvalitetu i sigurnost.

Tlak se može mjeriti na više načina ovisno o referentnom nivou u odnosu na koji ga mjerimo. Definicija apsolutnog tlaka bila bi da je on ona prava, stvarna sila na površinu, a referira se na vrlo visoki vakuum (ispod 0.01 Pa), diferencijalni tlak na bilo koju vrijednost tlaka, a pretlak kao podvrsta diferencijalnoga tlaka na promjenjivi atmosferski tlak (pretlak je razlika između apsolutnog i atmosferskog tlaka koja govori koliko je neki tlak veći od atmosferskog, dok je potlak razlika između atmosferskog i apsolutnog i govori koliko je neki tlak manji od atmosferskog). Može se reći da je apsolutni tlak jednak zbroju pretlaka i atmosferskog tlaka. Dominantna mjerila srednjeg i visokog tlaka u rasponu od nekoliko kPa do čak 3 GPa su tlačne vage.



Slika 3: Načini mjerenja tlaka

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Općenito o mjernoj nesigurnosti

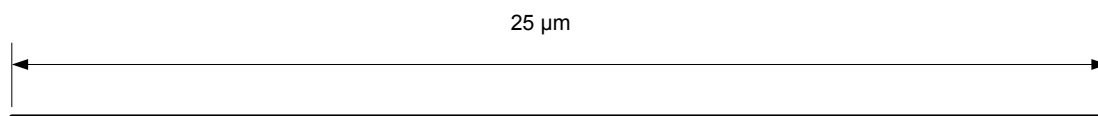
Mjerna nesigurnost (uncertainty of measurment) definirana je kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini uz određenu vjerojatnost.

Nijedno mjerenje ne može biti korektno interpretirano bez procjene o kvaliteti rezultata. Uz svako umjeravanje (i mjerenje) mora biti procijenjena i mjerna nesigurnost, što je od iznimne važnosti kako bi se mjerenja mogla smatrati sljeditivim kroz neporemećeni lanac usporedbi s referencama (etalonima). Postupak mora biti propisan u proceduri kvalitete, a izračun procjene mora biti dokumentiran za svako mjerenje. Mjerna nesigurnost se mora procijeniti radi nedvosmislenog iskazivanja i usporedbe mjernih rezultata dobivenih u različitim umjernim i ispitnim laboratorijima te radi usporedbe mjernih rezultata sa specifikacijama proizvođača ili zadanom tolerancijom.

Mjerenja nisu savršena kako zbog djelovanja slučajnih utjecaja (trenutna promjena temperature, tlaka i vlage ili neiskustvo mjeritelja, nesavršenost uređaja i osjetila), tako i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenta između dva umjeravanja, utjecaj mjeritelja pri očitavanju analogne skale, nesigurnost vrijednosti referentnog etalona itd.). Mjerna nesigurnost je upravo posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja, ona govori ponešto o kvaliteti mjerenja. Iskazuje se u obliku intervala nesigurnosti i sumnje u taj interval. Prema tome, dva su broja potrebna da bi se mjerna nesigurnost kvantificirala. Prvi je širina intervala nesigurnosti ili samo interval. Drugi je nivo pouzdanosti, koji ukazuje koliko smo sigurni da je „svarna vrijednost“ u intervalu nesigurnosti. Standardno se mjerni rezultat iskazuje kao na primjeru ispod.

Rezultat mjerenja: $d = 25 \mu m$

Proširena mjerna nesigurnost: $U = 2 \mu m, k = 2, P = 95\%$



Tako bismo za gornji primjer rekli da interval nesigurnosti $2 \mu m$ na nivou pouzdanosti od 95% uz faktor pokrivanja $k = 2$, odnosno to bi značilo da smo 95% sigurni da je rezultat mjerenja između 23 i 27 μm .

Kao što sam već napomenuo, uzroci (izvori) mjernih nesigurnosti mogu biti svakojaki, mogu biti vidljivi ili nevidljivi, slučajni ili sustavni. Stvarna se mjerenja nikada ne provode u idealnim uvjetima. Najčešći izvori pogrešaka i nesigurnosti kod mjerenja su sljedeći:

- Mjerni instrument – Instrumenti su podložni pogreškama kao što su nestalnost, trošenje, pomaci, slaba rezolucija, šum, interpolacija, itd.
- Objekt mjerenja – koji možda nije stabilan, ima slabu rezoluciju, ponovljivost, histerezu, pomak od nule, nelinearnost, itd.
- Mjerna metoda – nedostaci mjernog postupka, poteškoće u mjerenju, gradijenti, nestalnosti, živi uzroci itd.
- „Uvezene“ nesigurnosti – Nesigurnost umjernih instrumenata ugrađuje se u nesigurnost mjerenja koje se njima provodi. (Ali nesigurnost zbog neumjerenih instrumenata bila bi puno veća)
- Vještina mjeritelja – Neka mjerenja ovise o vještini i prosudbi mjeritelja. Jedna osoba može biti više ili manje pogodna od druge za provedbu osjetljivih mjerenja te imati oštrije oko za fina očitavanja. (Ali grube pogreške ne ubrajaju se u mjernu nesigurnost, stoga ako mjeritelj radi grube pogreške, mjerenje nije važeće.)
- Uzrokovanje – Mjerenja koja se provode moraju dobro reprezentirati proces koji se ispituje.
- Parametri okoline – Temperatura, barometarski tlak, vlažnost i drugi uvjeti mogu znatno utjecati na mjerni instrument ili predmet mjerenja, a time i na mjerni rezultat.

Općenito, gore navedene, kao i druge nesigurnosti, pojedinačni su izvori koji doprinose ukupnoj nesigurnosti mjerenja.

2.1.1. Metode procjene mjerne nesigurnosti

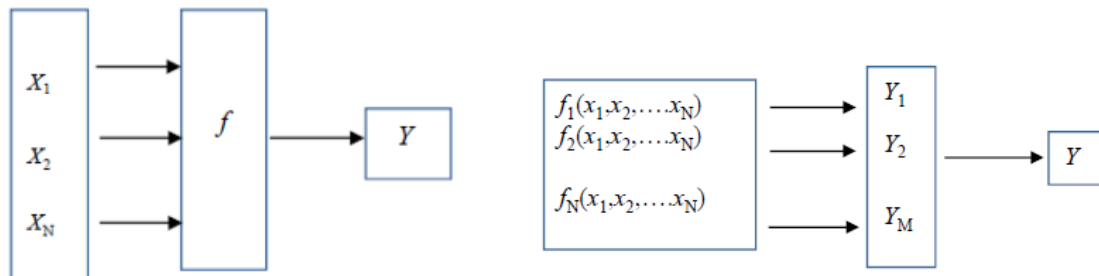
- 1.) GUM METODA (ISO-GUM)
- 2.) MCS metoda
- 3.) Procjenom ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja sukladno normi TS 21748 : 2004

GUM METODA:

Osnovni koraci:

1. Mjerni model:

U većini slučajeva mjerena veličina Y ne mjeri se izravno, nego se određuje iz N drugih veličina x_1, x_2, \dots, x_N na temelju funkcijskog odnosa koji predstavlja osnovni matematički model za potpuno određenje mjerene veličine.



Slika 4: Skalarni odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine (lijevo), vektorski odnos između ulaznih veličina i mjerene veličine (desno)

Prije računanja sastavljene (kombinirane) mjerne nesigurnosti potrebno je podatke iz svih izvora svesti na istu razinu pouzdanosti, tj. na standardnu nesigurnost $u(x_i)$.

2. Određivanje standardnih nesigurnosti $u(x_i)$ ($k = 1$) procjena ulaznih veličina x_1, x_2, \dots, x_N :

Bez obzira na izvor nesigurnosti, dva su načina za procjenu $u(x_i)$. Metoda procjene „tipa A“ (Sastavnica nesigurnosti A vrste) i metoda procjene „tipa B“ (Sastavnica nesigurnosti B vrste). Kod većine mjerenja potrebne su procjene oba tipa.

a) Standardna nesigurnost A vrste (tip A):

Zasniva se na bilo kojoj vrijedećoj statističkoj metodi, iz niza ponovljenih mjerenja uz primjenu normalne ili Studentove razdiobe. Za podatke dobivene statistički, standardna nesigurnost se računa iz standardne devijacije (standardno odstupanje) za sve podatke dobivene mjerenjem. Takav način obrade primjeren je Gaussovoj ili normalnoj razdiobi, gdje su podaci grupirani oko srednje vrijednosti, a učestalost njihova pojavljivanja pada odmicanjem od srednje vrijednosti.

Srednja vrijednost (aritmetička sredina)

$$\bar{x}_l = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n x_{l,k}$$

Eksperimentalno standardno odstupanje (eksp. standardna devijacija, eksp. normni odmak)

$$s(x_l) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$$

Eksperimentalno standardno odstupanje srednje vrijednosti

$$s(\bar{x}_l) = \frac{s(x_l)}{\sqrt{n}}$$

Tada je je standardna nesigurnost $u(x_i)$ i-te ulazne veličine

$$(x_i) = s(\bar{x}_l)$$

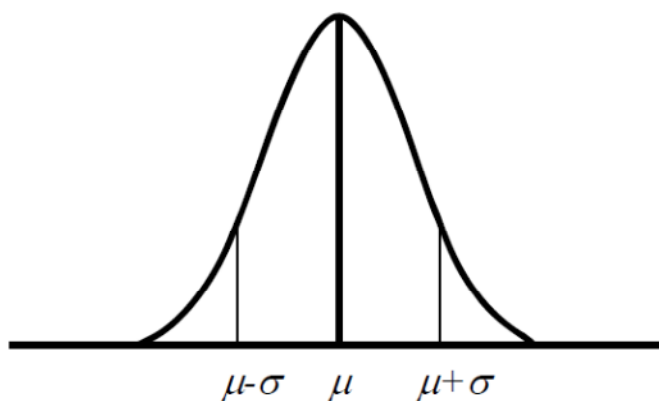
Ako izraz za $s(x_l)$ uvrstim u izraz za $s(\bar{x}_l)$, dobivam

$$u(x_i) = s(\bar{x}_l) = \frac{s(x_l)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum (x_k - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

U gornjim jednadžbama n je broj ponovljenih mjerenja.

b) Standardna nesigurnost B vrste (tip B):

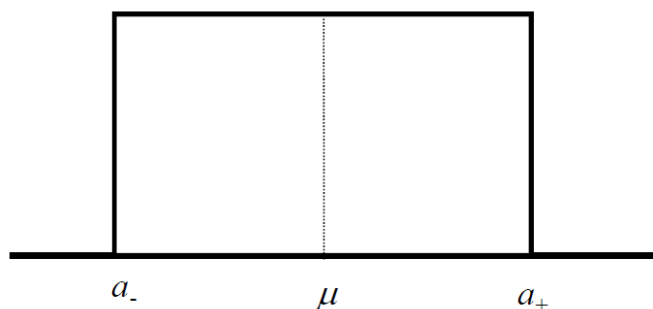
Procjena se temelji na drugim informacijama, kao što su znanstvena prosudba svih raspoloživih podataka o x_i , prethodno iskustvo ili poznavanje ponašanja i svojstava instrumenta, prethodni mjerni podaci, podaci iz vanjskih umjernica i ovjernica, podaci iz proizvođačkih specifikacija i tehnički podaci, podaci iz proračuna, podaci iz objavljenih izvora (članak, knjiga, priručnici), vlastito nahodjenje (zdrav razum), ... Procjena se zasniva na apriornim razdiobama vjerojatnosti (normalna ili Gaussova, pravokutna ili jednolika, trokutasta i dr.).



Slika 5: Gaussova ili normalna razdioba

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

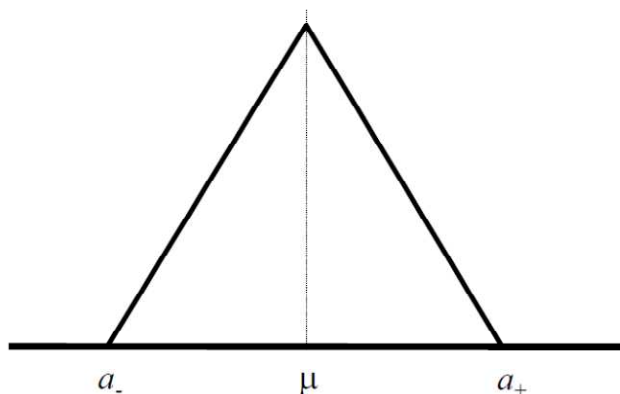
Gdje je σ standardna devijacija (standardno odstupanje), μ očekivanje uz najveću vjerojatnost.



Slika 6: Pravokutna ili jednolika razdioba

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Gdje je a polu-interval nesigurnosti.



Slika 7: Trokutasta razdioba

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

U slučaju da se mjerna nesigurnost uzima iz vanjskih umjernica, gdje je izražena kao proširena nesigurnost, mora je se podijeliti s faktorom pokrivanja k (najčešće $k=2$). Kada se nesigurnost računa metodom B, tada je poznat samo interval nesigurnosti (npr. granična pogreška, tolerancija i sl.) u kojem će vjerojatno biti prava vrijednost, a takva se razdioba naziva pravokutna (slika 8).

Kada se nađu i popišu doprinosi svih z izvora nesigurnosti i -te ulazne veličine, nalazi se ukupni doprinos mjerne nesigurnosti i -te ulazne veličine x_i prema donjem izrazu.

$$u(x_i) = \sqrt{\sum_{k=1}^z \{[u(x_i)]_k \cdot c_{i,k}\}^2}$$

Gdje je $c_{i,k}$ koeficijent osjetljivosti i -te ulazne veličine od k -tog izvora nesigurnosti.

3. Određivanje sastavljene (kombinirane) standardne nesigurnosti $u_c(y)$ ($k = 1$):

Sastavljena standardna nesigurnost $u_c(y)$ određuje se odgovarajućim sastavljanjem standardnih nesigurnosti procjena ulaznih veličina ako je procjena mjerne veličine y dana preko funkcijske zavisnosti o procjenama ulaznih veličina x_i .

$$y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_N)$$

Tada je standardna nesigurnost pridružena mjernoj veličina y dana izrazom:

$$\boxed{\text{Nekorelirane ulazne veličine}} \left\{ u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(x_i)]^2} , \quad c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \right.$$

Gdje je c_i koeficijent osjetljivosti koji opisuje u kojoj mjeri na procjenu izlazne veličine y utječe procjena ulazne veličine x_i . Koeficijent osjetljivosti je zapravo parcijalna derivacija funkcije y modela po ulaznoj veličini x_i .

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \right] + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \right]}$$

$\boxed{\text{Korelirane ulazne}}$

4. Određivanje proširene mjerne nesigurnosti.

Proširena mjerna nesigurnost je veličina koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. Dobiva se množenjem složene standardne nesigurnosti $u_c(y)$ s faktorom pokrivanja k , a označuje se s U .

$$U = k \cdot u_c(y)$$

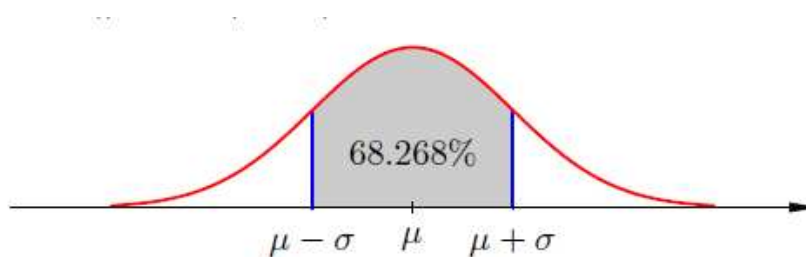
Nivo pouzdanosti P u postocima usko je povezan s faktorom pokrivanja k . Tako će biti:

$$k = 1 \Rightarrow P = 68,268 \% \approx 68 \%$$

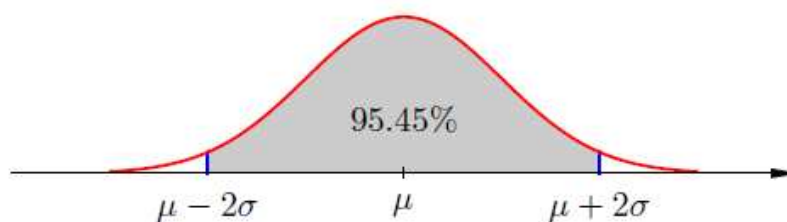
$$k = 2 \Rightarrow P = 95,45 \% \approx 95 \%$$

$$k = 3 \Rightarrow P = 99,73 \%$$

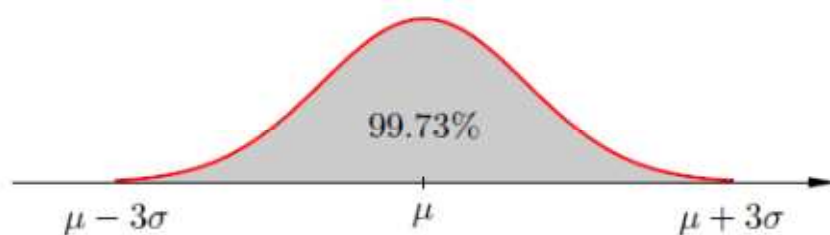
Kao što se može vidjeti na slikama 8, 9 i 10.



Slika 8: Prikaz nivoa pouzdanosti uz $k=1$



Slika 9: Prikaz nivoa pouzdanosti uz $k=2$

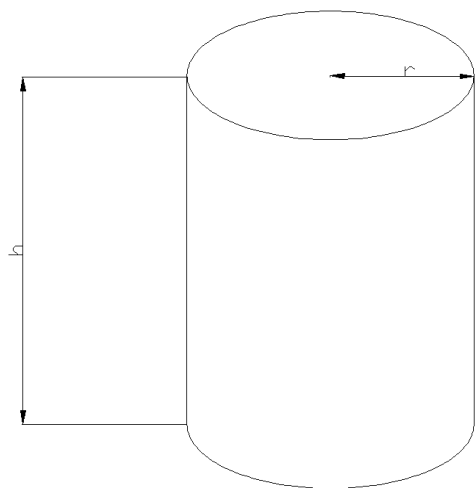


Slika 10: Prikaz nivoa pouzdanosti uz $k=3$

Relativnu standardnu mjernu nesigurnost definira se kao standardnu mjernu nesigurnost podijeljenu apsolutnom vrijednošću izmjerene vrijednosti veličine.

Primjer za određivanje mjerne nesigurnosti (kombinacija tipa A i tipa B)⁵:

Potrebno je pronaći mjernu nesigurnost mjerenja volumena valjka na slici 13, ako su se mjerenja radiusa (r) i visine valjka (h) ponavljala 9 puta i dobivene su sljedeće vrijednosti (tablica 1).



$$V = f(r, h) = r^2 \pi \cdot h$$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial V}{\partial x_i}$$

$$c_r = \frac{\partial (r^2 \pi \cdot h)}{\partial r} = 2r\pi h$$

$$c_h = \frac{\partial (r^2 \pi \cdot h)}{\partial h} = r^2 \pi$$

Slika 11: Valjak radiusa r i visine h

Poznati su sljedeći podaci:

Izmjera radiusa (r) valjka:

1. Iz umjernice metra čija je ukupna duljina 3 m poznato je:
 - mjerna nesigurnost umjeravanja metra je 0,3% očitavanja
 - nigdje ne pokazuje točno, a kod 1 m pokazuje 3 mm manje
2. Pogreška rezolucije je 0,5 mm (podjela metra po 1 mm).
3. Zbog izvijanja metra pogreška je najviše 10 mm.
4. Zbog čitanja metra iskosa (s ljestvi) pogreška je najviše 5 mm.
5. Zbog odoka određenog centra kruga pogreška je najviše 15 mm.

⁵ Tablice i zadatak napravljeni su u Excelu

Izmjera visine (h) valjka:

1. Iz umjernice metra čija je ukupna duljina 3 m poznato je:
-mjerna nesigurnost umjeravanja metra je 0,3% očitavanja
-nigdje ne pokazuje točno, a kod 3 m pokazuje 4 mm manje ($2 \cdot (-4) \text{ mm} = -8 \text{ mm}$)
2. Pogreška zbog nastavljanja (2 mjerenja) je 10 mm.
3. Pogreška rezolucije je $2 \cdot 0,5 \text{ mm} = 1 \text{ mm}$ (podjela metra po 1 mm).
4. Zbog izvijanja metra u 2 mjerenja pogreška je najviše 15 mm.
5. Zbog čitanja metra iskosa u 2 mjerenja (oba s ljestvi) pogreška je najviše 8 mm.

Broj mjerenja	radius r [mm]	Visina h [mm]
1	991	5989
2	992	5990
3	990	6015
4	1015	6003
5	1005	5990
6	1003	6013
7	988	6015
8	993	5983
9	995	5993
sr. vrijednost [mm]	996,8888889	5999
st. devijacija [mm]	8,908485343	12,63922466
st. dev. sr. vrijednosti [mm]	2,969495114	4,213074887

Tablica 1: Izmjera radijusa r i visine h valjka (mjerna nesigurnost tipa A)

Izvor nesigurnosti	Procjena veličine	Iznos nesigurnosti	Raspodjela vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost	Doprinos nesigurnosti
Radius r (9 izmjera)	996,8888889	2,969495114	normalna	1	2,969495114	1	2,969495114
Korekcija -3mm (umjernica)	-3	2,990666667	normalna	2	1,495333333	1	1,495333333
Max. pogreška rezolucije	0	0,5	pravokutna	1,732051	0,288675135	1	0,288675135
Max. pogreška zbog izvijanja	0	10	pravokutna	1,732051	5,773502692	1	5,773502692
Max. pogreška pogleda iskosa	0	5	pravokutna	1,732051	2,886751346	1	2,886751346
Centar kruga odoka	0	15	pravokutna	1,732051	8,660254038	1	8,660254038
/	993,8888889	/	/	/	/	u(r)	11,30503972

Tablica 2: Mjerna nesigurnost izmjera radiusa r (mjerna nesigurnost tipa B)

Izvor nesigurnosti	Procjena veličine	Iznos nesigurnosti	Raspodjela vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost	Doprinos nesigurnosti
Visina h (9 izmjera)	5999	4,213074887	normalna	1	4,213074887	1	4,213074887
Korekcija -8mm (umjernica)	-8	17,997	normalna	2	8,9985	1	8,9985
Nastavljanje	0	10	pravokutna	1,732051	5,773502692	1	5,773502692
Max. pogreška rezolucije	0	1	pravokutna	1,732051	0,577350269	1	0,577350269
Max. pogreška zbog izvijanja	0	15	pravokutna	1,732051	8,660254038	1	8,660254038
Max. pogreška pogleda iskosa	0	8	pravokutna	1,732051	4,618802154	1	4,618802154
/	5991	/	/	/	/	u(h)	15,12359092

Tablica 3: Mjerna nesigurnost izmjera visine h (mjerna nesigurnost tipa B)

Izvor nesigurnosti	Procjena veličine	Iznos nesigurnosti	Raspodjela vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost	Doprinos nesigurnosti
Radius r [m]	0,993888889	0,01130504	normalna	1	0,01130504	37,4125253	0,422950084
Visina h [m]	5,991	0,015123591	normalna	1	0,015123591	3,10331273	0,046933232
Volumen [m ³]	18,5919466	/	/	/	/	/	/
c_r [m ²] - koeficijent osjetljivosti za r	37,41252529	/	/	/	/	/	/
c_h [m ²] - koeficijent osjetljivosti za h	3,103312735	/	/	/	/	/	/
Sastavljena nesigurnost $u_c(y)$ [m ³]	0,425546122	/	/	/	/	/	/
Faktor pokrivanja k	2	/	/	/	/	/	/
Proširena mjerna nesigurnost U [m ³]	0,851092244	/	/	/	/	/	/

Tablica 4: Sastavljena i proširena mjerna nesigurnost mjerenja volumena valjka V (kombinacija mjerne nesigurnosti tipa A i tipa B)

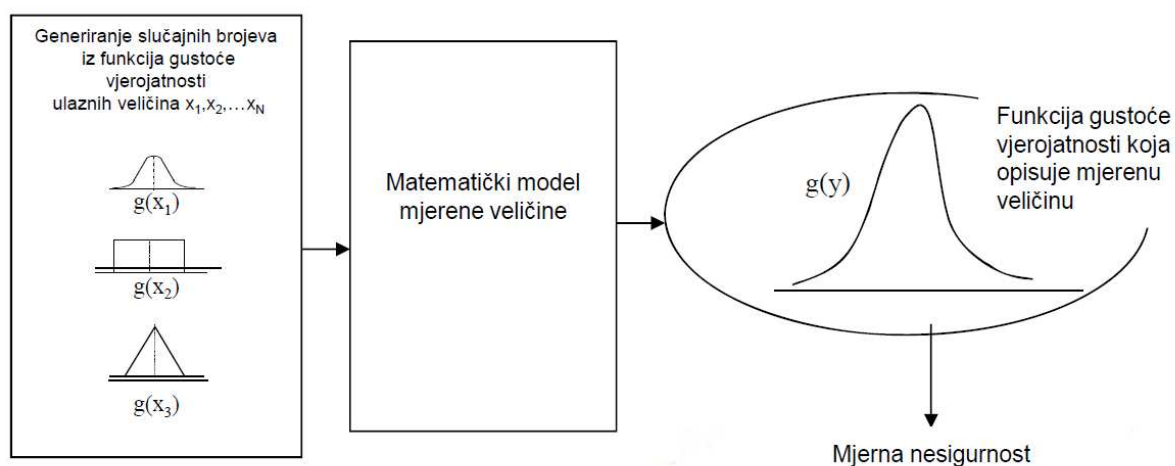
Sumarno se mogu napisati sljedeći koraci kod postupka izračunavanja mjerne nesigurnosti GUM metodom:

1. Matematički izraziti ovisnost mjerne veličine (izlazne veličine y) o ulaznim veličinama x_i
 $[y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_N)]$
2. Utvrditi i primijeniti sve važne ispravke.
3. Sastaviti popis svih izvora nesigurnosti (mjerni instrument, objekt mjerenja, mjerna metoda, „uvezene“ nesigurnosti, uzrokovanje, parametri okoline, ...) u obliku analize nesigurnosti tj. tablice s budžetom nesigurnosti: metoda određivanja (A, B), razdioba vjerojatnosti, osjetljivost izlazne veličine y na pojedini izvor nesigurnosti $x_i(c_i)$, broj opažanja n .
4. Odrediti standardnu mjernu nesigurnost svake utjecajne veličine uključivo i ispravaka (tip A, i Tip B)
5. Izračunati sastavljenu mjernu nesigurnost.
6. Izračunati proširenu mjernu nesigurnost.
7. Izraziti mjerni rezultat u obliku

$$Y = y \pm U, \quad P = \dots$$

MCS METODA:

MCS metoda u postupku procjenjivanja mjerne nesigurnosti rezultata mjerenja temelji se na generiranju slučajnih brojeva iz funkcija gustoće vjerojatnosti za svaku ulaznu veličinu x_i i stvaranju odgovarajuće vrijednosti izlazne veličine y , kombinirajući različite razdiobe kojima su definirane ulazne veličine.



Slika 12: Shematski prikaz procjene mjerne nesigurnosti MCS metodom

Kod primjene MCS metode potrebno je napisati matematički model mjerene veličine, odnosno izraziti funkcijski odnos između mjerene veličine i ulaznih veličina. Primjena ove metode omogućava vrednovanje i usporedbu rezultata dobivenih GUM metodom. MCS metoda zahtijeva široko znanje o naravi mjerene veličine te dobro poznavanje područja statistike i vjerojatnosti.

PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI NA OSNOVI PONOVLJIVOSTI I OBNOVLJIVOSTI REZULTATA MJERENJA SUKLADNO NORMI TS 21748 : 2004:

Kao osnova za procjenu mjerne nesigurnosti koriste se mjere rasipanja: Ponovljivost i obnovljivost rezultata mjerenja. Te su mjere procijenjena standardna odstupanja dobivena iz analize eksperimentalnih podataka. Ako je eksperiment postavljen tako da se variraju svi glavni utjecaji na mjernu nesigurnost, tada će procjena mjerne nesigurnosti biti pouzdana i neće biti potrebno koristiti GUM metodu.

2.1.2. Pogreške nasuprot nesigurnosti:

Treba napomenuti u ovom dijelu razliku između nesigurnosti i pogreške. Pogreška (error) je razlika između „mjerne vrijednosti“ i „stvarne vrijednosti“, a nesigurnost je kvantifikacija sumnje u rezultat mjerenja (pogreške mjerenja nisu sastavnice mjerne nesigurnosti, treba ih izbjeći pažljivim radom i čestim provjerama). Kad god su pogreške poznate iz bilo kojih razloga, mjerni se rezultat mora korigirati (ispraviti) za njihov iznos, npr. primjenjujući korekcije iz umjernice instrumenta kojim smo mjerili. U tom je slučaju nesigurnost tih korekcija jednaka mjernoj nesigurnosti umjeravanja. Dakle može se reći da su pogreške čiju vrijednost ne znamo izvori nesigurnosti.

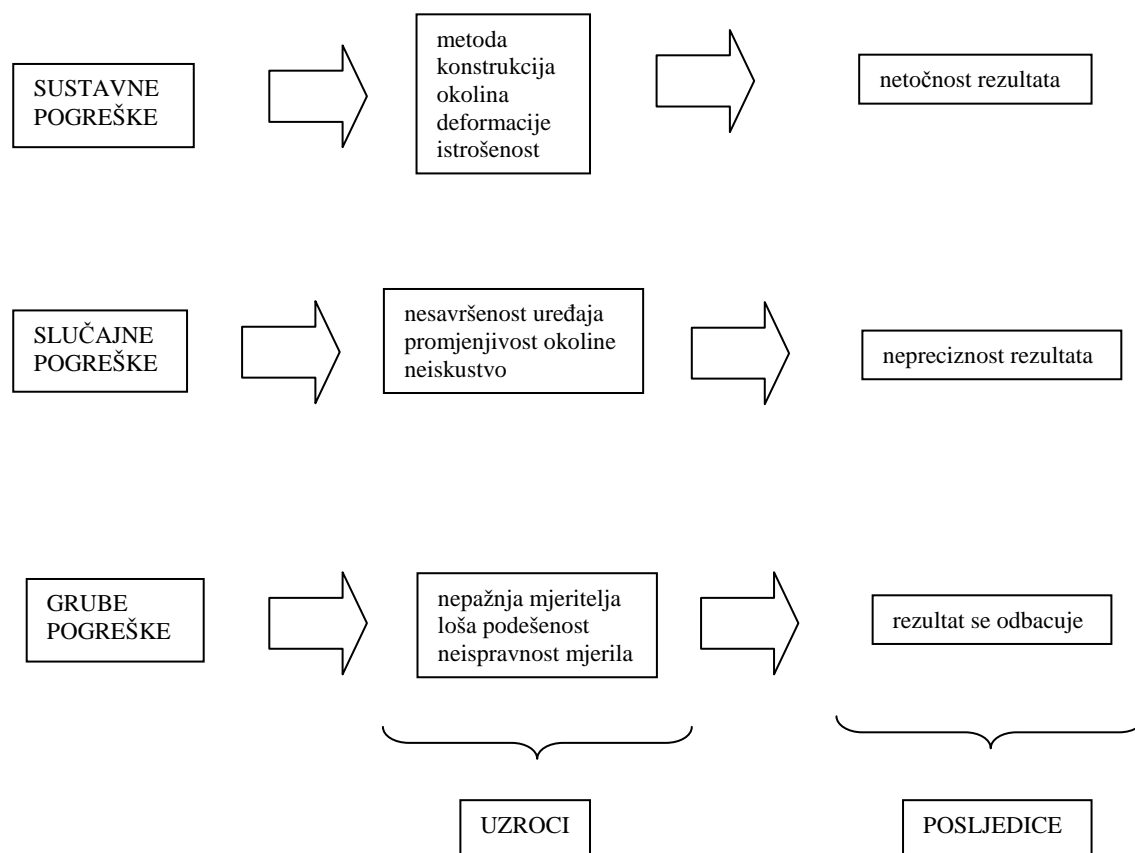
Pogreške mogu biti: a.) SUSTAVNE

b.) SLUČAJNE

c.) GRUBE

Sustavnim se pogreškama nazivaju pogreške kada tijekom ponovljenih mjerenja iste veličine ostaju stabilne ili se mijenjaju na predvidiv način, slučajne su one kada se tijekom ponovljenih mjerenja iste veličine mijenjaju na nepredvidiv način, a grube pogreške su one kada tijekom ponovljenih mjerenja iste veličine znatno odstupaju u odnosu na ostale.

Vrsta pogreške znatno utječe na mjerni rezultat:



Točnost (ili netočnost)⁶ je različit pojam od nesigurnosti, ispravno je reći da je „točnost“ kvalitativni izraz (npr. mjerenje je točno ili netočno), a nesigurnost je kvantitativna. Kada se napiše znak „ \pm “, govorimo o nesigurnosti, a ne o točnosti. Netočnost se, slično kao i pogreška, definira kao razlika između dobivenog rezultata mjerenja i referentne vrijednosti. Referentna je vrijednost vrijednost koja služi kao dogovorena referenca za mjernu vrijednost, a može biti utvrđena na osnovi srednje vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih mjernom opremom više razine točnosti.

⁶ eng. accuracy

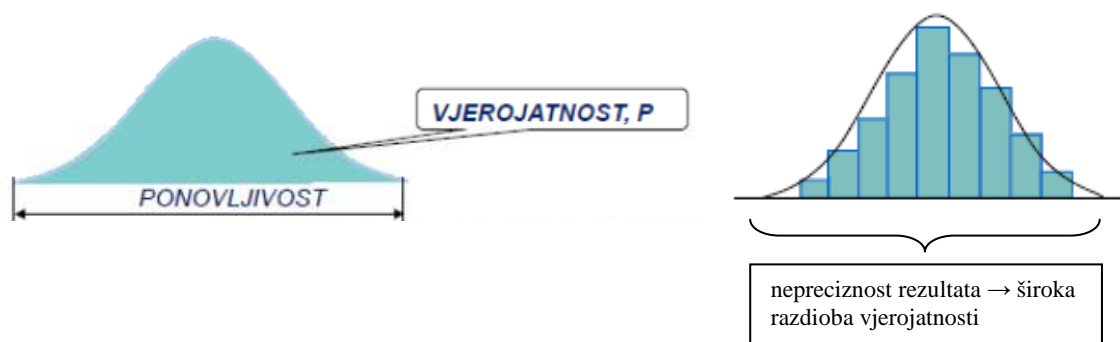


Slika 13: Prikaz netočnosti mjernog rezultata

Ponovljivost (repeatability) je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju:

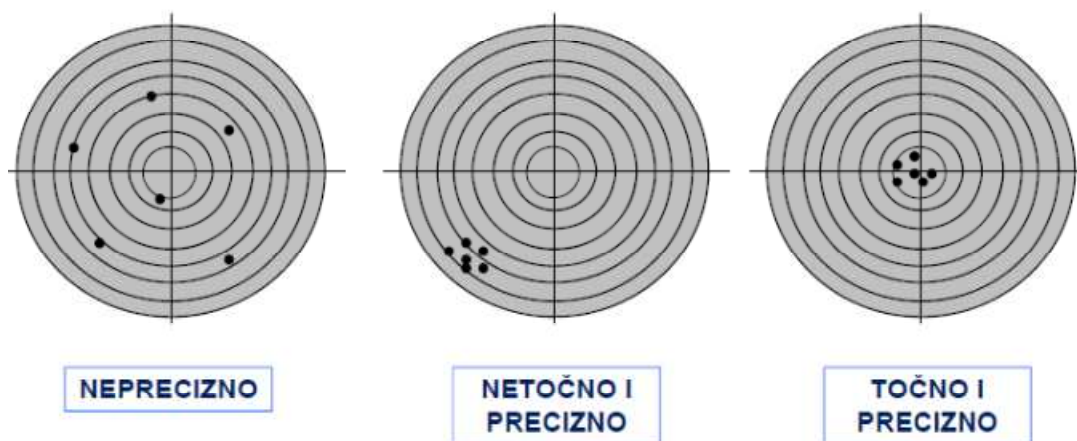
- isti mjerni postupak
- istog mjeritelja
- isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima
- isto mjerno mjesto
- ponavljanje u kratkom vremenu

Ponovljivost se može izraziti količinski s pomoću značajki rasipanja rezultata mjerenja, a u najvećoj mjeri određuje utjecaj **mjerila** u varijaciji mjernog sustava.



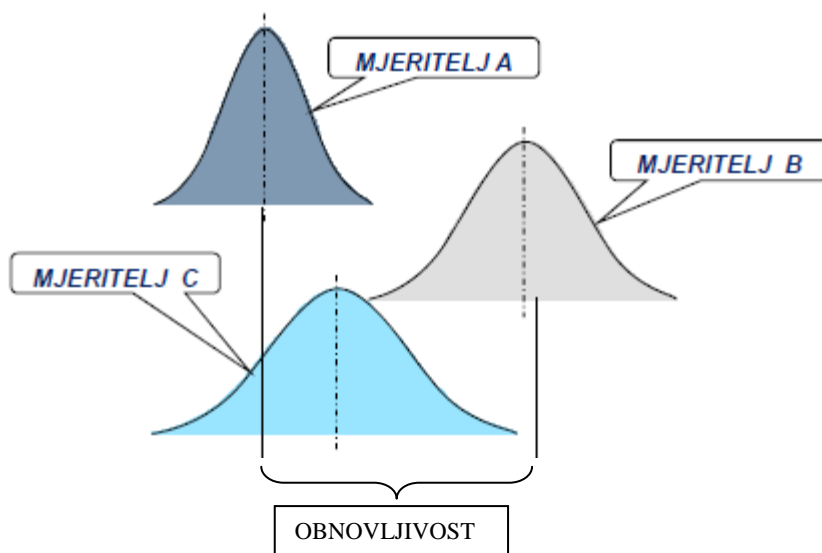
Slika 14: Prikaz ponovljivosti i nepreciznosti mjernog rezultata

Na slici 14 (desno) prikazana je nepreciznost (ili preciznost) mjernog rezultata. Preciznost se karakterizira mjerama rasipanja rezultata kod ponovnih mjerenja (precizno = kvalitetno = malo rasipanje), tako je u slučaju „preciznih“ mjerenja malo rasipanje mjernih rezultata u odnosu na srednju vrijednost, tj. mala je širina razdiobe vjerojatnosti nalaženja rezultata.



Slika 15: Prikaz razlike između preciznosti i točnosti

Obnovljivost (reproducibility) je rasipanje rezultata mjerenja dobiveno od strane većeg broja mjeritelja pri višestrukom mjerenju iste karakteristike na istim dijelovima uz korištenje istog ili različitog mjernog instrumenta. Obnovljivost se isto može izraziti količinski s pomoću značajki rasipanja rezultata mjerenja, a u najvećoj mjeri određuje utjecaj **mjeritelja** u varijaciji mjernog sustava.



Slika 16: Prikaz obnovljivosti mjernog rezultata

2.2. Općenito o umjeravanju

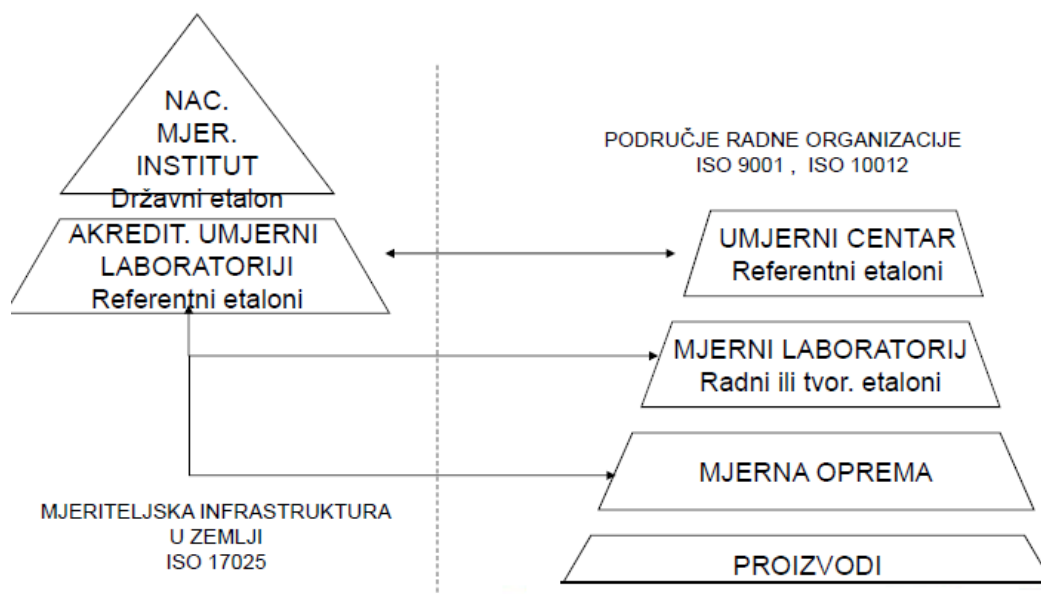
Umjeravanje⁷ (calibration) je znanost (postupak) prenošenja fizikalne veličine od etalona do nepoznatog mjerila na efikasan i ekonomičan način. To je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. Ono mora biti sljedivo.

Mjerni rezultat, koji daje neko mjerilo, mora biti izražen u zakonitim jedinicama i mora se moći s utvrđenim mjernim nesigurnostima dovesti u vezu s referencijskim etalonima.

Etalon se definira kao materijalizirana mjera, mjerilo, referencijska tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti kakve veličine da bi mogli poslužiti kao referencija. Etaloni se dijele na:

- a) Međunarodni etalon: etalon priznat međunarodnim dogovorom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- b) Državni etalon: etalon priznat odlukom države da bi služio u toj državi kao osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- c) Primarni etalon: etalon koji je izabran ili za koji je opće potvrđeno da ima najveću mjeriteljsku kvalitetu, a čija se vrijednost potvrđuje bez upućivanja na druge etalone iste veličine.
- d) Sekundarni etalon: etalon kojemu je vrijednost dodijeljena usporedbom s primarnim etalom iste veličine.

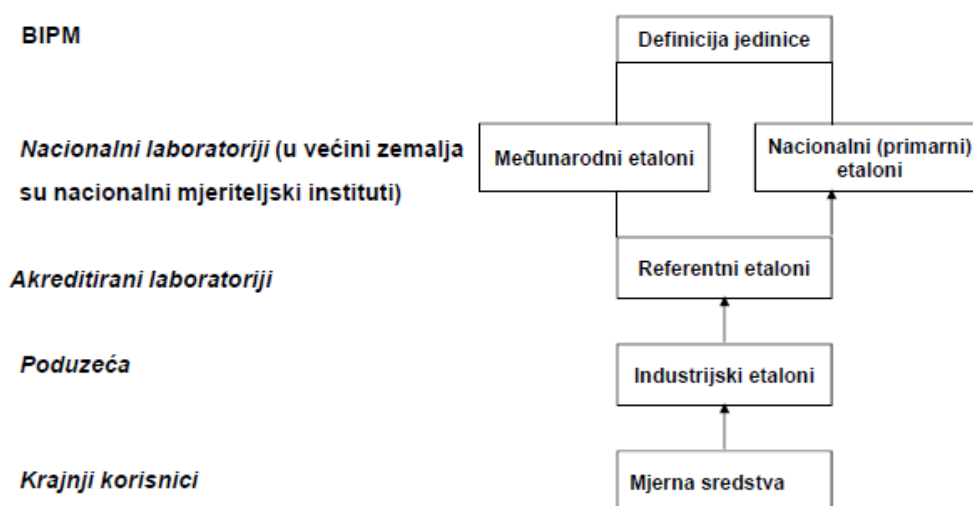
⁷ Za umjeravanje koriste se još i nazivi kalibriranje i baždarenje



Slika 17: Shema umjeravanja

Sljedivost (traceability) je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti nekog etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba (lanac sljedivosti) koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti.

Kao drugu definiciju mogu navesti da se lanac sljedivosti definira kao neprekinut lanac usporedbi koje se moraju provesti kako bi se osiguralo da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezan s referencijskim etalonima na najvišoj razini, koji u konačnici završavaju s primarnim etalom.



Slika 18: Shema lanca sljedivosti

Elementi sljedivosti su:

Neprekinuti slijed usporedbi: koji vodi prema etalonu koji je prihvatljiv stranama, obično državnom ili međunarodnom etalonu.

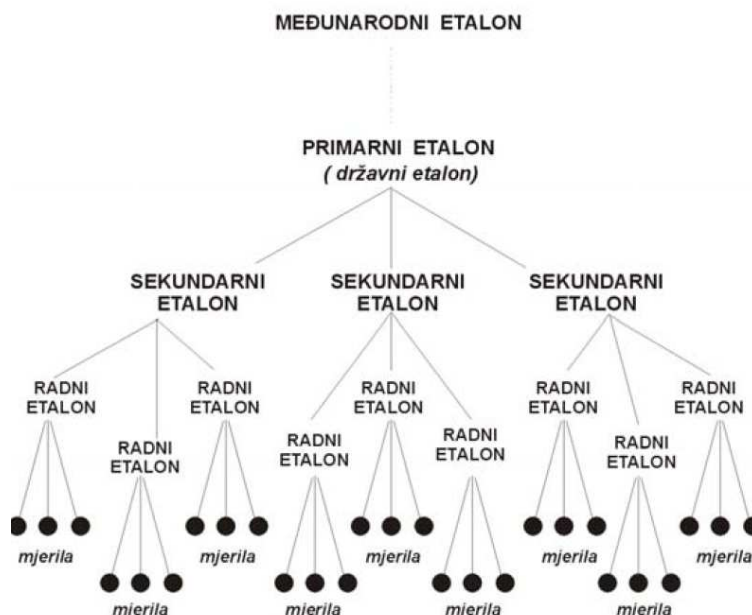
Mjerna nesigurnost: za svaki korak lanca sljedivosti mora se izračunati u skladu s dogovorenim metodama te se mora navoditi tako da se može izračunati za cijeli lanac.

Dokumentacija: svaki korak u lancu mora se provoditi u skladu s dokumentiranim i općeprihvaćenim postupcima; rezultati se moraju dokumentirati na isti način.

Mjerodavnost: laboratoriji ili izvršna tijela koja provode jedan ili više koraka u lancu moraju posjedovati dokaz o svojoj tehničkoj mjerodavnosti; na primjer da su ovlašteni.

Referencija u SI jedinicama: lanac usporedbi mora završavati primarnim etalonima za ostvarenje SI jedinica.

Periodičnost umjeravanja: umjeravanja se moraju ponavljati u odgovarajućim intervalima: duljina intervala između dva umjeravanja ovisi o nizu varijabla, npr. zahtijevanoj nesigurnosti, frekvenciji uporabe, načinu uporabe, stabilnosti opreme i dr.



Slika 19: Sljedivost etalona i mjerila

2.3. Tlačne vage

Tlačne vage predstavljaju jedno od najtočnijih mjerila tlaka. Korištenje sličnih oblika započelo je prije otprilike 150 godina, to su bili razni uređaji na kojima je tlak bio generiran kao djelovanje poznate sile na poznatu površinu. Razvoj tlačnih vaga bio je stimuliran industrijskom primjenom parnih strojeva i potrebom za razumijevanjem termodinamičkih svojstava plinova i tekućina pri različitim temperaturama i tlakovima. Danas se tlačne vage najčešće koriste kao etaloni za umjeravanje različitih vrsta mjerila tlaka. Princip rada im se temelji na promjeni hidrostatskog tlaka. Sastoje se od sklopa klip/cilindar, sustava za ostvarivanje vertikalne sile na klip te sustava za generiranje tlaka u radnom fluidu. Najvažniji dio svake tlačne vage je sklop klip/cilindar gdje je precizno izrađen okomiti klip umetnut u blisko prilagođeni cilindar, oboje poznatih poprečno presječnih površina. Sklop je izrađen s najfinijim strojarskim tolerancijama (mikronske tolerancije), a ta dva elementa zajedno određuju površinu koja se zove efektivna površina (effective area) A_e . Pojam efektivne površine sklopa je uveden da eliminiira nepoznatu silu koja je posljedica viskoznog toka fluida između klipa i cilindra. Ona je funkcija dimenzija klipa i cilindra, ali ne mora nužno odgovarati ni jednoj posebnoj dimenzionalnoj površini sklopa.

2.3.1. Princip rada tlačne vage

Mase poznate težine postavljaju se na vrh slobodnog klipa (utezi) koji je također dio opterećenja. Na donji kraj klipa dovodi se fluid pod tlakom (najčešće dušik ili bijelo ulje,

ovisno o tome radi li se o uljnoj ili plinskoj vagi), sve dok se ne razvije dovoljna sila da podigne klip s utezima. Kada klip slobodno rotira u cilindru, vaga je u ravnoteži s nepoznatim tlakom u sustavu (mjereni tlak p). Postoji tendencija fluida da istječe iz sustava kroz procjep između klipa i cilindra. Film fluida omogućuje nužno podmazivanje između te dvije površine, a klip rotira da eliminira trenje. Zbog istjecanja, fluid u spremniku mora biti kontinuirano dodavan da bi održavao klip s utezima u plutajućem stanju, to se često postiže primjenom promjenjivog volumena. Osnovna formula za izračunavanje tlaka zapravo je definicija fizikalne jedinice za mjerenje tlaka Pa:

$$p = \frac{F}{A_e}$$

U drugom koraku bit će uvedene korekcije nužne za precizno utvrđivanje tlaka.

Najbitniji zahtjevi koji se postavljaju na tlačnu vagu:

- sklop klip/cilindar mora biti izrađen od materijala sposobnih izdržati visoka dinamička tlačna opterećenja u elastičnom području svoje $\sigma - \varepsilon$ karakteristike i sa što nižim koeficijentom linearne distorzije (izobličenje); današnji je trend upotreba volframovog karbida s različitim udjelima kobalta i nikla za izradu klipa i cilindra

- izrada i završna obrada klipa i cilindra moraju biti s tolerancijama na nivou ispod μm , a zazor između njih ne smije biti veći od $0.5 - 1 \mu\text{m}$ i mora biti približno konstantan duž cijele granice

- efektivna površina pri atmosferskom tlaku mora biti približno konstantna po cijeloj dužini klipa i cilindra; geometrija treba biti što točnija – promjeri od $1 - 50 \text{ mm}$ s odstupanjem od kružnog oblika $\pm 100 \text{ nm}$ smatraju se prihvatljivim rezultatom

- posebna pažnja treba biti posvećena brtvljenju kako bi se postigla apsolutna nepropusnost sustava; to se postiže odgovarajućom upotrebom pomno odabranih spojnih elemenata i brtvi; najbitnija je brtva blizu dna cilindra jer mora osigurati nepropusnost pri maksimalnom tlaku tijekom duljeg vremena korištenja tlačne vage

- sklop klip/cilindar mora biti konstruiran tako da se izbjegne skupljanje tekućine u gornjem dijelu cilindra kako bi se izbjegli neki neželjeni efekti (uzgonsko djelovanje na neke dijelove klipa i skupljanje tekućine na klipu)

-sklop klip/cilindar mora biti opremljen termometrom kako bi se se za vrijeme mjerenja mogle očitavati temperature klipa i cilindra budući da efektivna površina znatno zavisi o temperaturi

-pozicioniranje mase na klip može biti ručno ili automatski s pomno odabranim utezima (po mogućnosti integralnim utezima izrađenima od nemagnetičnog, nehrđajućeg čelika) koji će koncentrirati silu na vertikalni dio klipa; automatski sustav pozicioniranja utega na klip ne smije opteretiti tlačnu vagu nikakvom silom jer se time gubi na preciznosti mjerenja; ako se koriste elektromotori, moraju biti štice i daleko od sklopa klip/cilindar da se izbjegne utjecaj njihovih toplinskih gubitaka na točnost mjerenja

2.3.2. Vrste tlačnih vaga

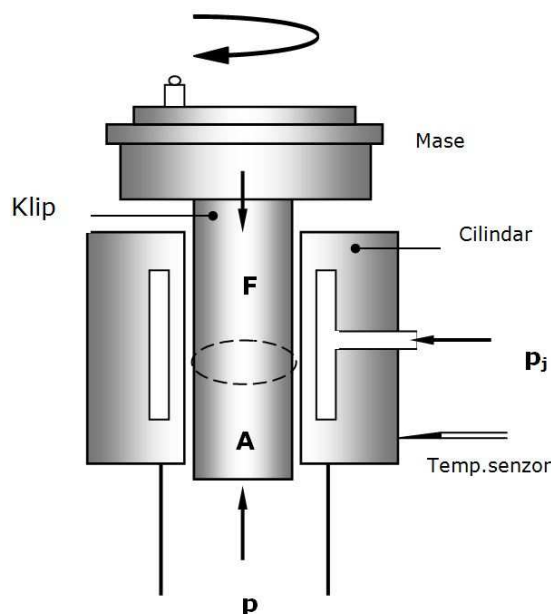
Pregled osnovnih tipova sklopova (s obzirom na konstrukciju):

Danas prevladavaju tri osnovne konfiguracije.

-tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar (simple) kod kojih je $p_j = 0$

-tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar (re - entrant) kod kojih je $p_j = p$

-tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom (controlled - clearance) kod kojih je $p_j \neq p$



Slika 20: Osnovne konfiguracije tlačne vage

p_j - tlak u košuljici cilindra tlačne vage [Pa]

Tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar

Tlak koji se mjeri djeluje samo na bazu klipa. U ovoj konfiguraciji klip i cilindar su izloženi slobodnoj elastičnoj deformaciji ovisnoj o tlaku, geometriji klipa i cilindra, elastičnim konstantama klipa i cilindra i o fizikalnim svojstvima radnog fluida. Ovaj tip vaga je najrasprostranjeniji i najčešće upotrebljavan. Maksimalni tlak koji se njima mjeri je 500 Mpa. Ovu izvedbu ograničava velika brzina propadanja klipa pri većim opterećenjima kao posljedica izražene deformacije cilindra i česta izmjena brtvi kod mjerenja visokih tlakova.

Tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar

Kod ovog tipa tlačnih vaga mjereni tlak djeluje ne samo na donju bazu klipa/cilindra već i na oplošje cilindra reducirajući time velike deformacije cilindra izloženog visokim tlakovima. Vrijednost deformacije ovisi o istim parametrima nabrojenima kod prethodne vrste tlačnih vaga. U osnovi, ova vrsta tlačnih vaga konstruirana je kako bi se kompenzirale velike distorzije klipa i cilindra pri visokim tlakovima. Radni tlakovi im sežu do 700 Mpa, a u prošlosti je bilo specijalnih tipova koji su se koristili do čak 1.3 GPa. Najviši radni tlak ovisit će o radnom području jer se pri atmosferskim tlakovima koriste veliki zazori između klipa i cilindra koji uzrokuju znatno propuštanje. Iako su bile popularne u prošlosti, danas se manje koriste.

Tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom

Promjenjivi tlak p_j u košuljici cilindra kojim se utječe na veličinu zazora između klipa i cilindra kontrolira se zasebnim sustavom. Veličina zazora ovisi o konstrukcijskoj geometriji sustava, inicijalnom zazoru između klipa i cilindra, vrijednostima p i p_j , elastičnim konstantama klipa i cilindra i o svojstvima radnog fluida kao i u prethodna dva slučaja. Ova konfiguracija izuzetno je korisna za mjerenje tlakova iznad 500 Mpa, do čak 2 Gpa, a ono što je čini boljom u odnosu na prethodni tip jest činjenica da je operativna čak i na srednjim tlakovima. To je omogućeno zahvaljujući pravilnom odabiru tlaka p_j kojim je moguće održavati konstantnu vrijednost zazora između klipa i cilindra, a čime se posredno utječe i na željenu brzinu propadanja klipa.

Druga podjela tlačnih vaga je s obzirom na vrstu radnog fluida kojim se ostvaruje sila na klip, pa se tako tlačne vage dijele na:

- a) uljne
- b) vodene
- c) plinske

Plinske tlačne vage omogućuju mjerenje u pretlačnom kao i u apsolutnom načinu (otprilike od -1 bar do 1400 bar). Za više tlakove koriste se uljne tlačne vage jer izlaženje plina postaje pri visokim tlakovima preizdašno (otprilike od 1 bar do 4000 bar). Vodene tlačne vage koriste se za mjerenje malo viših tlakova od plinskih vaga, ali nižih od uljnih (otprilike od 0,5 bar do 700 bar).

2.3.3. Određivanje efektivnog tlaka p_e kod uljnih tlačnih vaga:

Odabir primjerenog uljnog medija predstavlja kompromis između proturječnih zahtjeva sustava – s jedne strane niska viskoznost ulja omogućuje brz odziv sustava, a s druge strane potrebna je visoka viskoznost kako bi se reduciralo bježanje ulja kroz zazor između klipa i cilindra.

Kod računanja efektivnog tlaka moraju se uzeti u obzir bitne korekcije koje se odnose na površinu, silu i tlak okoline. Kod korekcije površine treba uzeti u obzir utjecaj temperature, tj. temperaturno rastezanje klipa i cilindra, pojavu elastične deformacije zbog djelovanja tlaka te utjecaj geometrije sklopa (kao što sam prije naveo zbog sila viskoznog trenja.) Kod korekcije sile treba uzeti u obzir varijacije gravitacijskog ubrzanja, uzgonsko djelovanje zraka i radnog fluida, površinsku napetost radnog fluida te razliku u visini stupca fluida. Kod tlaka okoline korekcije ovise o režimu rada koji može biti apsolutni tlak ili pretlak.

Sljedeći izraz koristi se za izračunavanje efektivnog tlaka, a uzima u obzir sve potrebne korekcije:

$$p_e = \frac{\left[\sum_i \left[m_i \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}} \right) \right] + (hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a) \right] \cdot g \cdot \cos \theta + \Gamma \cdot c}{\underbrace{A_0 \cdot (1 + \lambda \cdot p_e)}_{\substack{\text{geometrija} \\ \text{elastična deformacija}}} \cdot \underbrace{[1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]}_{\substack{\text{temperaturno rastezanje}}}} + \underbrace{\Gamma \cdot c}_{\text{površinska napetost}}$$

korekcije efektivne površine

gdje su:

p_e	[Pa]	- efektivni tlak generiran na sklopu
m_i	[kg]	- masa utega i-tog utega postavljena na sklop
g	[m/s ²]	- iznos lokalnog gravitacijskog ubrzanja
ρ_a	[kg/m ³]	- gustoća okolišnog zraka
ρ_{mi}	[kg/m ³]	- gustoća i-tog utega
ρ_f	[kg/m ³]	- gustoća radnog fluida
α_k	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperaturene ekspanzije (temperaturnog rastezanja) klipa
α_c	[°C ⁻¹]	- koeficijent temperature ekspanzije (temperaturnog rastezanja) cilindra
A_0	[m ²]	- efektivna površina sklopa pri nultom tlaku (atmosferskom tlaku)
t	[°C]	- temperatura sklopa za vrijeme ispitivanja
t_r	[°C]	- referentna temperatura pri kojoj je mjerena A_0
λ	[MPa ⁻¹]	- koeficijent distorzije (elastične deformacije)
θ	[-]	- kut otklona klipa od vertikale
v	[m ³]	- potopljeni volumen klipa ⁸
h	[mm]	- razlika u visini u odnosu na referentni položaj ⁹
Γ	[mN/m]	- površinska napetost
c	[m]	- opseg klipa

⁸ To je volumen za koji se radi korekcija zbog uzgonskog djelovanja fluida

⁹ Razlika u visini etalonskog i ispitivanog sklopa

Korekcija zbog uzgonskog djelovanja okolnog zraka definirana je faktorom

$$\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mi}}\right)$$

a obuhvaća uzgonsko djelovanje okolnog zraka na klip, nosač utega i dodanu masu. Gustoću okolnog zraka računamo prema formuli:

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p_{ok} - 0,009024 \cdot RH \cdot e^{0,0612 \cdot t_{ok}}}{273,15 + t_{ok}}$$

dok je gustoća pojedinog dijela ρ_{mi} obično zadana u podacima za tlačnu vagu i u umjernicama mase dodatnih utega.

Korekcija radnog fluida $(hA_0 - v) \cdot (\rho_f - \rho_a)$ može se rastaviti na dva dijela:

$hA_0 \cdot (\rho_f - \rho_a)$ predstavlja korekciju zbog razlike u visini od referentnog položaja do položaja klipa u trenutku kada je vaga u ravnoteži, tj. kada se očitava mjereni tlak (obuhvaća razliku težine stupca radnog fluida i stupca okolnog zraka)

$-v \cdot (\rho_f - \rho_a)$ predstavlja uzgonsku silu radnog fluida na potopljene dijelove klipa

Kako u stvarnosti nije moguće dobiti savršeno vertikalnu silu, kut θ pokazuje odstupanje od vertikale, tj. umnožak njegova kosinusa i težine daje pravu vertikalnu komponentu sile kojom opterećujemo klip.

$\Gamma \cdot c$ je korekcija zbog površinske napetosti koja djeluje u smjeru težine na mjestu gdje klip „izranja“ iz fluida

$(1 + \lambda \cdot p_e)$ je faktor kojim je dana (linearna) ovisnost promjene efektivne površine u ovisnosti o mjerenoj tlaku; moguće je i uvrstiti nominalni tlak umjesto efektivnog

$[1 + (\alpha_k + \alpha_c)(t - 20)]$ korigira promjenu ploštine radne površine zbog odmaka od referentne temperature (u ovom slučaju je referentna temperatura 20°C)

3. POSTUPAK UMJERAVANJA PRETVORNIKA TLAKA VISOKOG RAZREDA TOČNOSTI

U ovom poglavlju bit će ukratko opisan postupak umjeravanja pretvornika tlaka (mjerila tlaka) visokog razreda točnosti po preporuci DKD-R6-1¹⁰ Guideline (Calibration of Pressure Gauges) s naglaskom na tip A umjeravanja u kojem je potrebno više puta ponoviti uzlazna i silazna mjerenja za razliku od tipa B i tipa C.

Cilj je umjeravanja ocijeniti kolika je pogreška dotičnog mjerila tlaka koje se ispituje u odnosu na referencijsko mjerilo (u slučaju mojih mjerenja u laboratoriju bila je to uljna tlačna vaga) te procijeniti mjernu nesigurnost. Procijenjena greška u postupku umjeravanja mora se korigirati kod svakog nadolazećeg mjerenja dotičnim umjerenim mjerilom, a mjerna bi se nesigurnost trebala smanjiti u odnosu na stanje prije umjeravanja mjerila.

Umjeravanje se vrši direktnim usporedbama rezultata mjerenja umjeravanog mjerila tlaka s referencijskim mjerilom (etalonom) ili važećim standardom koji je direktno ili indirektno u vezi (preko lanca sljedivosti) s nacionalnim standardom. Referencijski standardi u uporabi su mjerila tlaka s dugotrajnom stabilnošću, u pravilu su to visokokvalitetni tekućinski manometri i tlačne vage. Korištenje tekućinskih manometara je ograničeno za više tlakove zbog tražene visine stupca tekućine. Ako se postupak umjeravanja ne vrši u referencijskim uvjetima (standardno gravitacijsko ubrzanje, 20 °C), moraju se primijeniti korekcije u izračunu tlaka kod umjeravanja. Mjerne nesigurnosti koje su pripisane tim korekcijama zbog utjecajnih veličina moraju se uzeti u obzir u izračunu kao novi utjecaj u ukupnoj mjernoj nesigurnosti. Preporuka je da mjerna nesigurnost koja se pripisuje vrijednostima koje daje referencijsko mjerilo ne bi trebala prelaziti $\frac{1}{3}$ vrijednosti očekivane mjerne nesigurnosti umjeravanog mjerila. Umjeravanje se treba provesti tek nakon što se temperatura okoline i umjeravanog instrumenta izjednače. Period zagrijavanja instrumenta na temperaturu okoline i potencijalno zagrijavanje umjeravanog instrumenta zbog opskrbljivanja naponom (električni pretvornici) mora se uzeti u obzir kod proračuna. Umjeravanje se vrši na stabilnoj ambijentalnoj temperaturi ($\pm 1K$), a ta temperatura mora biti između 18°C i 28°C i treba ući u zapisnik. Ako gustoća zraka ima utjecaj na mjerni rezultat, osim ambijentalne (okolišne) temperature, atmosferski tlak i relativna vlažnost također moraju ući u zapisnik.

¹⁰ DEUTSCHER KALIBRIERDIENST (DKD)

Najčešće vrste mjerila koja se umjeravaju su pretvornici tlaka, kovni manometri i tlačni transmiteri s električnim izlaznim signalom. Kovni manometri mogu biti s Bourdonovom cijevi, s membranom i s elastičnom komorom. To su analogni uređaji kojima se rezultat mjerenja očitava s analogne skale. Kod pretvornika tlaka tlak se pretvara u električnu veličinu koja se može precizno mjeriti (struja, napon, frekvencija), a dijele se na:

- I. Kapacitivni – 2 elektrode i 2 kondenzatora čine strujni krug, djelovanjem tlaka deformira se dijafragma i mijenja se iznos kapaciteta kondenzatora
- II. Tenzometrijski
- III. Piezorezistivni (Silicon sensors), otpornički – mjeri se promjena otpora zbog naprezanja
- IV. Piezoelektrični – osjetnik je kristal kvarca, a deformiranjem se proizvodi elektricitet

Kod mjerila tlaka bitan je način iskazivanja točnosti instrumenta. Tako se uvode pojmovi kao što je klasa točnosti (razred točnosti). Iskazan je sljedećim izrazom:

$$Kl = \frac{\Delta p}{p_{max} - p_{min}} \cdot 100\%$$

Izražava se u postocima, gdje je Δp razlika tlaka (pogreška) za koju mjerni instrument odstupa u odnosu na punu skalu FS (Full scale), tj. razliku između maksimalnog i minimalnog tlaka koji mjeri instrument. Iz razreda točnosti računa se dopušteno odstupanje (FS) dotičnog mjerila tlaka koje se umjerava u odnosu na etalon prema izrazu:

$$dopušteno\ odstupanje = \frac{p_{max} \cdot Kl}{100}$$

3.1. Metode umjeravanja

Generalno, postoje tri metode umjeravanja mjerila tlaka: tip A, tip B i tip C. Razlikuju se u broju točaka umjeravanja, odnosno u broju silaznih i uzlaznih mjerenja. Najveći broj točaka umjeravanja je kod tipa A, dok je manji ako se umjeravanje vrši po tipu B ili tipu C. Koja će se metoda koristiti, ovisi o razredu točnosti mjerila (tablica 5). Tako se vidi da će, ako je razred točnosti manji od 0,1, koristiti umjeravanje po tipu A, ako je razred točnosti između 0,1 i 0,6, umjeravanje će se vršiti po tipu B, a ako je razred točnosti veći od 0,6, umjeravat će se po tipu C.

Kod svih metoda umjeravanje se provodi u umjernim točkama podjednako raspoređenim između maksimalne i minimalne vrijednosti tlaka. Komparacija (usporedba) mjernih veličina koje su dobivene umjeravanjem mjerilom i referentnih vrijednosti može se odvijati prema:

- reguliranju tlaka prema indikaciji umjeravanog mjerila
- reguliranju tlaka prema indikaciji standarda

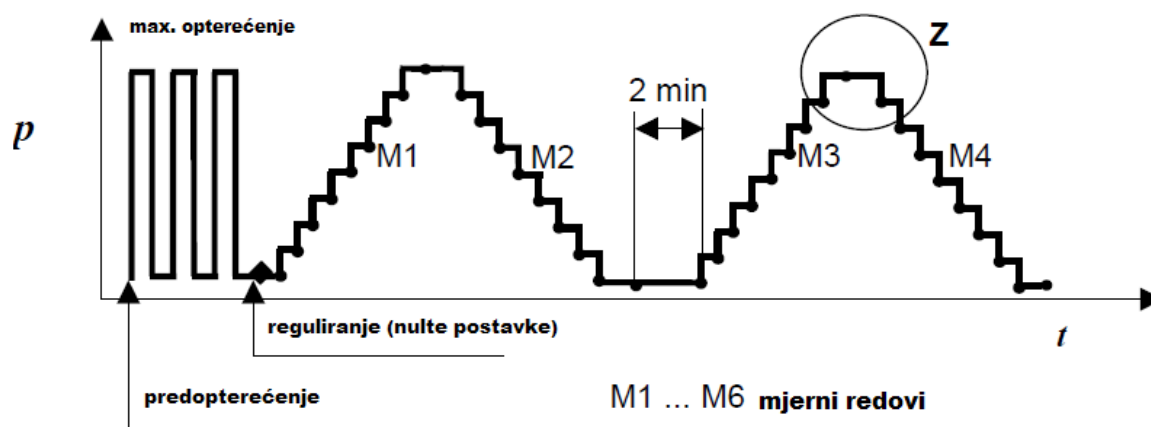
Vrijeme koje je sustav predopterećen, isto kao i vrijeme između dva predopterećenja, trebalo bi biti oko 30 sekundi. Korak između dvije točke umjeravanja, tj. vremenski razmak između dva uzastopna opterećenja tlaka trebao bi biti konstantan i ne bi trebao biti kraći od 30 sekundi, a vrijednost tlaka se ne bi trebala očitavati prije nego što prođe barem 30 sekundi od skoka tlaka. Najveću mjernu vrijednost (maksimalni tlak) mora se očitati dva puta, prije i poslije čekanja od oko dvije minute (slika 21). Nulte postavke na kraju mjerenja očitavaju se 30 sekundi nakon potpunog rasterećenja.

Tip umjeravanja	Razred (klasa) točnosti	Broj mjernih točaka s nulom (uzlaz/silaz)	Broj predopterećenja	Promjena opterećenja + stacionarno vrijeme (sekunde)	Vrijeme zastoja u konačnoj vrijednosti mjernog područja (minute)	Broj mjernih redova	
						uzlazno	silazno
A	< 0,1	9	3	> 30	2	2	2
B	0,1 ... 0,6	9	2	> 30	2	2	1
C	> 0,6	5	1	> 30	2	1	1

Tablica 5: Tipovi metoda umjeravanja s obzirom na razred točnosti umjeravanog instrumenta

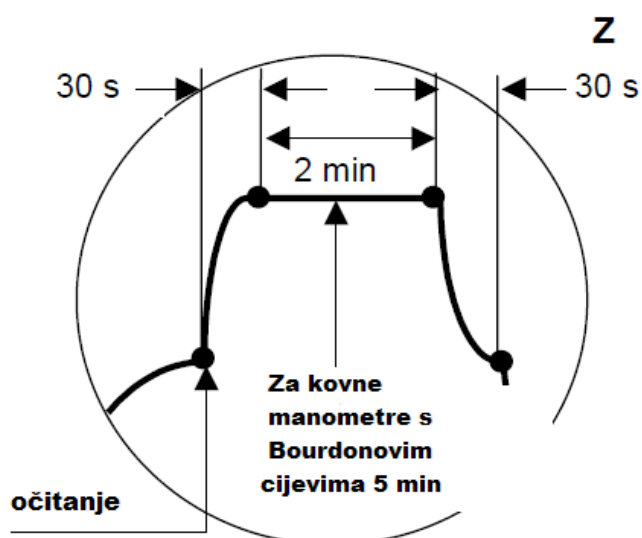
Kod umjeravanja mjerila koja mjere tlakove veće od 2500 bara, uvijek se koristi tip A umjeravanja.

3.1.1. Tip A



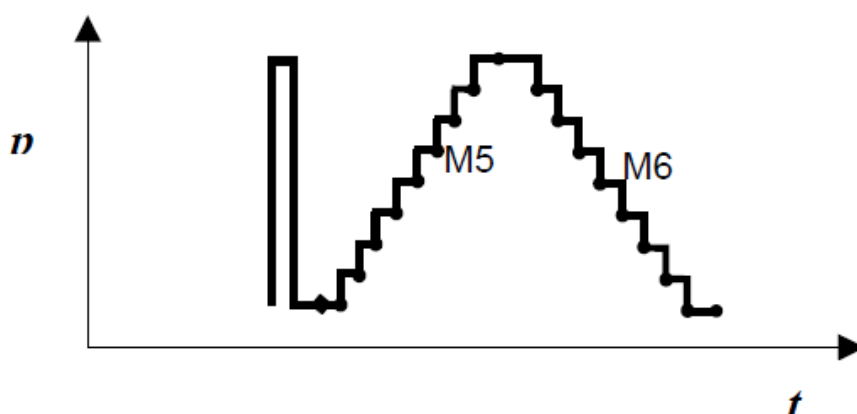
Slika 21: Dijagram umjeravanja (tip A)

Iz slike 21 vidljivo je da se kod postupka umjeravanja tipom A mjerilo prvo optereti do maksimalnog opterećenja, zatim se rastereti na nulte postavke i tako ponovi još dva puta. Zatim se odaberu točke umjeravanja (određeni broj točaka umjeravanja između maksimalne i minimalne vrijednosti tlaka koje može mjeriti umjeravano mjerilo) te se po tim točkama stupnjevano kreće do maksimalne vrijednosti (M1). Zatim se ide silaznim putem po tim istim točkama (M2), kada se vratimo na nulte postavke, sustav se rastereti i drži tako rasterećenim 2 minute te se postupak ponavlja (M3 i M4) s jednom razlikom koja je prikazana na slici 22 (detalj Z). Ta je razlika to da se na zadnjoj, najvišoj točki (kod maksimalnog opterećenja) postupno povećava tlak, zatim drži 2 minute na maksimumu i opet postupno rasterećuje u silaznom dijelu (M4).



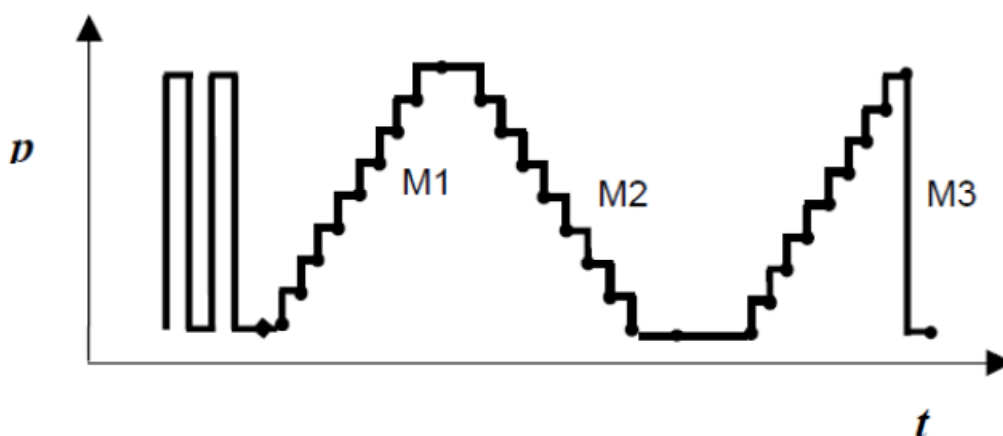
Slika 22: Dijagram umjeravanja (tip A, detalj Z)

U slučaju da je potrebno (iz bilo kojeg razloga), tip A predviđa i dodatak umjeravanja (slika 23), nakon što se završi s procedurom prikazanom na slici 21, ako ima potrebe, umjeravanje se može produljiti, a tada se dodatno još jednom mjerilo optereti maksimalnim tlakom i zatim rastereti te se uzlazno po određenim točkama umjeravanja stupnjevano opterećuje mjerilo do maksimalne vrijednosti (M5), drži tako oko 2 minute te se rasterećuje do nultih postavki (M6). U svakoj točki, bilo na uzlaznoj ili silaznoj putanji, bilježi se tlak koji pokazuje mjerilo, a kasnije se uspoređuje s tlakom etalona te se matematičkim proračunom nalazi mjerna nesigurnost i odstupanje od referentne vrijednosti za svaku točku.



Slika 23: Dijagram umjeravanja (tip A) – dodatak

3.1.2. Tip B

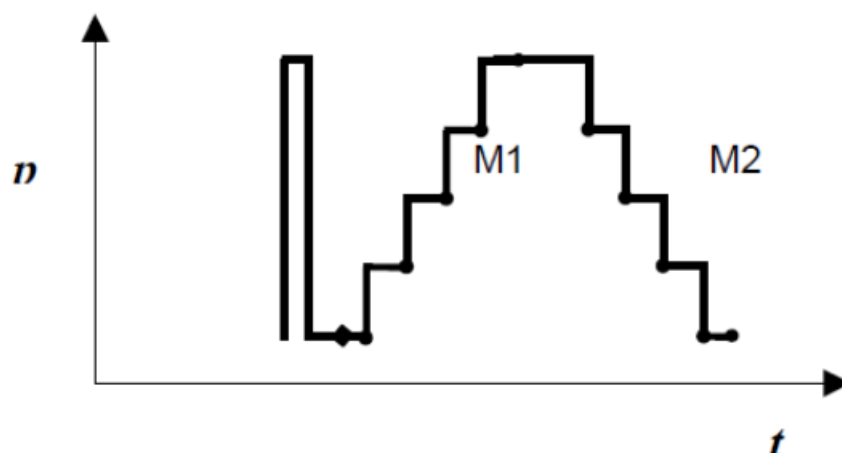


Slika 24: Dijagram umjeravanja (tip B)

Iz slike 24 vidljivo je da se kod postupka umjeravanja tipom B mjerilo prvo optereti do maksimalnog opterećenja, zatim se rastereti na nulte postavke i tako ponovi još jednom.

Zatim se odaberu točke umjeravanja te se po tim točkama stupnjevano kreće do maksimalne vrijednosti (M1). Zatim se ide silaznim putem po tim istim točkama (M2), kada se vratimo na nulte postavke, sustav se rastereti i drži tako rasterećenim 2 minute te se postupak ponavlja uzlazno do maksimalne vrijednosti (M3) te se zatim naglo rastereti na nulte postavke.

3.1.3. Tip C



Slika 25: Dijagram umjeravanja (tip C)

Na slici 25 vidi se da se kod postupka umjeravanja tipom C mjerilo prvo optereti do maksimalnog opterećenja, zatim se rastereti na nulte postavke bez ponavljanja. Zatim se odaberu točke umjeravanja te se po tim točkama stupnjevano kreće do maksimalne vrijednosti (M1). Zatim se ide silaznim putem po tim istim točkama (M2), a kada se vratimo na nulte postavke, postupak je završen.

3.2. Postupak proračuna

Prije proračuna koji slijedi u nastavku bit će iznesen popis oznaka koji će se koristiti u ovom poglavlju.

M1 ... M6	Mjerni redovi
max. load	Najveća vrijednost (u području umjeravanja)
Y	Izlazna veličina
X	Ulazna veličina
δX	Nepoznato mjerno odstupanje
K	Korekcijski faktor
x	Procijenjena ulazna veličina
y	Procijenjena izlazna veličina
c	Koeficijent osjetljivosti
k	Ekspanzijski faktor
a	Polu-interval distribucije
P	Vjerojatnost
$E[...]$	Očekivana vrijednost
u	Standardna nesigurnost
U	Proširena nesigurnost
w	Relativna standardna nesigurnost
W	Relativna proširena nesigurnost

p	Tlak
Δp	Sustavno mjerno odstupanje veličine tlaka
δp	Nepoznato mjerno odstupanje veličine tlaka
S	Koeficijent transmisije (kod transmitera)
ΔS	Sustavno mjerno odstupanje transmisijskog koeficijenta = $S-S'$
V	Napon
G	Faktor pojačanja
r	Rezolucija
f_0	Nulto odstupanje
b'	Ponovljivost
b	Obnovljivost
h	Histereza
U'	Širina (interval) pogreške (greške)
W'	Relativna širina greške
S'	Nagib linearne regresijske funkcije
p_e	Prijestupni tlak
m	Masa utega
g	Gravitacijsko ubrzanje
ρ	Gustoća
A	Efektivna površina sustava klip - cilindar
λ	Koeficijent deformacije sustava klip - cilindar
α	Linearni termički koeficijent ekspanzije klipa
β	Linearni termički koeficijent ekspanzije cilindra
t	Temperatura sustava klip - cilindar
h	Visinska razlika između umjeravanog instrumenta i etalonskog mjerila

Supply	Opskrbni napon
j	Broj mjerne točke
m	Broj mjernog reda (mjerne serije)
n	Broj mjernog ciklusa
a	Zrak
Fl	Srednje
m	Masa utega
0	Referentno stanje $t = 20^{\circ}\text{C}$
ref	Referentno stanje
cond. of use	stanje u pogonu
corr	Korekcija (mjerne veličine)

3.2.1. Procedura

1.) Mjerna nesigurnost:

Definicija i objašnjenje dani su u poglavlju 2., potpoglavljima 2.1. i 2.1.1. te su tamo izvedeni opći izrazi i objašnjen je opći postupak procjenjivanja mjerne nesigurnosti, koji se u pravilu ne razlikuje od ovog specifičnog slučaja kod umjeravanja mjerila tlaka po preporuci DKD-R6-1. Ovaj rad koristi opće prihvaćene matematičke izraze i veličine u uvjetima kada ne postoje korelacije između ulaznih veličina.

Matematički model			$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$
Standardna nesigurnost	$u(x_i)$	standardna nesigurnost pripisana ulaznoj veličini	
	c_i	koeficijent osjetljivosti	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$
	$u_i(y)$	doprinos standardne nesigurnosti ulazne veličine x_i [$u(x_i)$] standardnoj nesigurnosti izlazne, mjerne veličine y	$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$
	$u(y)$	ukupna standardna nesigurnost izlazne veličine y	$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$ $u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}$
Proširena nesigurnost	$U(y)$	proširena mjerna nesigurnost	$U(y) = k \cdot u(y)$
	k	faktor pokrivanja	$k = 2$ kod većine slučajeva iznosi 2, a tada je nivo pouzdanosti P=95%

Tablica 6: Određivanje mjerne nesigurnosti

Ako se koriste i pojmovi relativne nesigurnosti, tada se oznake za varijable u i U zamjenjuju oznakama w i W . U slučajevima veoma kompleksnih modela koeficijent osjetljivosti postaje nemoguće analitički izračunati, tada se on određuje numerički s pomoću računala. Još postoje dva posebna pravila po kojima se u nekim slučajevima uzima $c_i = \pm 1$, što vodi do pojednostavljenog modela izračuna.

2. Izlazne veličine pogreške (odstupanja):

Rezultat se zapisuje u obliku:

$$Y = X + \sum_{i=1}^N \delta X_i$$

Y	mjerna ili izlazna veličina
X	ulazna veličina/veličine prema funkcijskoj vezi $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$
δX_i	nepoznato mjerno odstupanje
$E(\delta X_i) = 0$	očekivana vrijednost

Komponenta $E(\delta X_i)$ ne sudjeluje u određivanju izlazne vrijednosti odstupanja (korekcije nisu primijenjene), ali utječe na mjernu nesigurnost.

Ovaj način iskazivanja primjeren je mjerilima tlaka s vlastitom mjernom skalom tlaka koju pokazuju na zaslonu uređaja (kovni manometri, pretvornici tlaka). Tu se mjerna nesigurnost također izražava u mjernim jedinicama kojima se mjeri fizikalna veličina tlaka.

Drugi način iskazivanja je:

$$Y = X \cdot \prod_{i=1}^N K_i$$

Y	mjerna ili izlazna veličina
X	ulazna veličina/veličine
$K_i = [1 + (\delta X_i)]$	korekcijski faktor (faktori)
δX_i	nepoznato odstupanje
$E(\delta X_i) = 0, E(K_i) = 1$	očekivana vrijednost

Komponente $E(\delta X_i)$ i $E(K_i)$ ne sudjeluju u određivanju izlazne vrijednosti odstupanja (korekcije nisu primijenjene), ali utječu na mjernu nesigurnost.

Ovaj način primjereniji je kod mjerila tlaka bez vlastite skale u mjernim jedinicama tlaka kao npr. kod transmitera s električnim izlaznim signalom, mjerna nesigurnost ovdje se izražava u bezdimenzijskom obliku.

3. Ulazne veličine:

Mjerne nesigurnosti pridružene ulaznim veličinama podijeljene su u dvije kategorije u odnosu na određivanje (tip A i tip B), što je detaljno objašnjeno u poglavlju 2.1.

Kao što sam rekao ranije, u mnogim slučajevima (kod mjerne nesigurnosti tipa B) poznata je samo gornja i donja vrijednost granice (a_+ i a_-), gdje je a polu-interval distribucije (nesigurnosti), sve vrijednosti unutar te granice mogu se smatrati jednako vjerojatnim. Takav slučaj se najbolje opisuje pravokutnom ili jednolikom razdiobom.

$$a_+ - a_- = 2a$$

pridružena standardna mjerna nesigurnost je:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Ako je vjerojatnije da vrijednosti leže bliže centru nego granici intervala, logičnije je pretpostaviti trokutastu ili U raspodjelu.

RASPODJELA	STANDARDNA MJERNA NESIGURNOST
TROKUTASTA	$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$
U OBLIK RASPODJELE	$u = \frac{a}{\sqrt{2}}$
ITD.	

Tablica 7: Ostale vrste raspodjele kod B tipa određivanja nesigurnosti

3.2.2. *Umjeravanje pretvornika tlaka i kovnih manometara s Bourdonovom cijevi*

3.2.2.1. *Model procjene*

Jednostavan model prikazivanja izlazne veličine je prikladan za određivanje mjernog odstupanja pokazanja instrumenta - posebno za mjerne veličine u smjeru povećavanja tlaka, a posebno za mjerne veličine u smjeru smanjivanja tlaka.

$$\Delta p_{up/down} = p_{ind,up/down} - p_{stand} + \sum_{i=1}^2 \delta p_i$$

$$\Delta p_{up/down} = p_{ind,up/down} - p_{stand} + \delta p_{zero\ deviation} + \delta p_{repeatability}$$

$Y = \Delta p_{...}$	mjerno odstupanje očitavanja (u indeksu up/down)
$X_1 = p_{ind, ...}$	indicirano od mjernog uređaja
$X_2 = p_{standard}$	vrijednost referentnog standarda
$X_3 = \delta p_{zero\ deviation}$	nepoznato mjerno odstupanje s obzirom na nulto odstupanje
$X_4 = \delta p_{repeatability}$	nepoznato mjerno odstupanje uslijed ponovljivosti

Vrijednost referentnog standarda je tlak koji očitava etalon. Taj tlak također unosi određenu nesigurnost (nesigurnost etalona) koja će kasnije ući u doprinos ukupnoj nesigurnosti.

Za srednju vrijednost (mean value) vrijede izrazi:

$$\Delta p_{mean} = p_{ind,mean} - p_{standard} + \sum_{i=1}^3 \delta p_i$$

$$\Delta p_{mean} = p_{ind,mean} - p_{standard} + \delta p_{zero\ deviation} + \delta p_{repeatability} + \delta p_{hysteresis}$$

$$\Delta p_{mean} = \frac{p_{ind,up} + p_{ind,down}}{2}$$

$X_5 = \delta p_{hysteresis}$	nepoznato mjerno odstupanje uslijed histereze
-------------------------------	--

Kada su uzlazni i silazni redovi mjerenja zasebno mjereni i tako uzeti u obzir, proširena mjerna nesigurnost U s faktorom pokrivanja $k = 2$ je:

$$U_{up/down} = k \cdot u_{up/down}$$

$$U_{up/down} = k \cdot \sqrt{u_{standard}^2 + u_{resolution}^2 + u_{zero\ deviation}^2 + u_{repeatability}^2}$$

Tzv. interval greške, širina greške¹¹ (error span) za sustavnu grešku je:

$$U'_{up/down} = U_{up/down} + |\Delta p_{up/down}|$$

Kada su korištene srednje vrijednosti uzlaznih i silaznih mjernih serija, proširena mjerna nesigurnost U s faktorom pokrivanja $k = 2$ se računa prema izrazu:

$$U_{mean} = k \cdot \sqrt{u_{up/down}^2 + u_{hysteresis}^2}$$

Gdje je za mjernu nesigurnost $u_{up/down}$ uzeta veća vrijednost ponovljivosti.

Pripadajuća širina greške (error span) određena je izrazom:

$$U'_{mean} = U_{mean} + |\Delta p_{mean}|$$

3.2.2.2. Analiza nesigurnosti

Br.	Veličina	Procjena	Širina distribucije	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost	Doprinos nesigurnosti	Jedinica
	X_i	x_i	$2a$	$P(x_i)$		$u(x_i)$	c_i	$u_i(v)$	
1	$p_{ind, \dots}$	$p_{i, ind, \dots}$	$2r$	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(r) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2r}{2}\right)^2}$	1	u_r	bar
2	$p_{standard}$	$p_{i, standard}$		normalna	2	$u(standard)$	-1	$u_{standard}$	bar
3	$\delta p_{zero deviation}$	0	f_0	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(f_0) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{f_0}{2}\right)^2}$	1	u_{f_0}	bar
4	$\delta p_{repeatability}$	0	b'	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(b') = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b'}{2}\right)^2}$	1	$u_{b'}$	bar
5	$\delta p_{hysteresis}$	0	h	pravokutna	$\sqrt{3}$	$u(h) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2}$	1	u_h	bar
	Y	$\Delta p \dots$						$u(v)$	bar

Tablica 8: Analiza nesigurnosti kod umjeravanja kovnih manometara s Bourdonovim cijevima i pretvornika tlaka

¹¹ Širina greške je maksimalna očekivana razlika između mjerne vrijednosti i konvencionalno „ispravne“ vrijednosti na koju se referiramo (vrijednost etalona). Širina greške može se koristiti za određivanje točnosti.

Procjena mjerne nesigurnosti mora se provesti za svaku umjeravanu vrijednost, za svaki skok opterećenja tlaka, tj. za svaku mjernu točku.

Tlak	Mjerno odstupanje	Standardna nesigurnost			Očekivana nesigurnost $U (k = 2)$	Širina greške U^{\pm}
		Doprinos 1	...	Doprinos 2		
bar	bar		bar		bar	bar
min.						
...						
max.						

Tablica 9: Proračun nesigurnosti

Za slučaj da se umjerava pretvornik tlaka, tok proračuna je isti kao i gore navedeni (za kovni manometar s Bourdonovom cijevi) osim, ako je potrebno, može se još uzeti u obzir podatak o obnovljivosti b u izračun, ako postoje ponavljana montiranja sprave.

$X_6 = \delta p_{\text{reproducibility}}$	nepoznato mjerno odstupanje uslijed obnovljivosti
---	---

Br.	Veličina	Procjena	Širina distribucije	Razdioba vjerojatnosti	Djelitelj	Standardna nesigurnost	Osjetljivost	Doprinos nesigurnosti	Jedinica
	X_i	x_i	$2a$	$P(x_i)$		$u(x_i)$	c_i	$u_i(v)$	
6	$\delta p_{\text{reproducibility}}$	0	b	rectangle	$\sqrt{3}$	$u(b) = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{b}{2}\right)^2}$	1	u_b	bar

Tablica 10: Analiza nesigurnosti kod umjeravanja pretvornika tlaka – dodatak

Proširena nesigurnost ($k=2$) za uzlazne i silazne serije tada je jednaka:

$$U_{\text{up/down}} = k \cdot u_{\text{up/down}}$$

$$U_{\text{up/down}} = k \cdot \sqrt{u_{\text{standard}}^2 + u_{\text{resolution}}^2 + u_{\text{zero deviation}}^2 + u_{\text{repeatability}}^2 + u_{\text{reproducibility}}^2}$$

Ostalo je apsolutno isto kao što je navedeno na prethodnim stranicama.

3.2.2.3. Određivanje relevantnih parametara za analizu nesigurnosti

Rezolucija mjernog uređaja r vezana je za podjelu skale uređaja (interval skale). Za određivanje doprinosa nesigurnosti pola vrijednosti rezolucije pripisuje se polovini širine intervala pravokutne distribucije ($a = \frac{r}{2}$).

Nulto odstupanje f_0 : Nulta točka mora biti prethodno postavljena, prije svakog mjernog ciklusa, koji se sastoji od uzlaznih i silaznih serija, i mora biti zapisana prije i poslije svakog mjernog ciklusa. Očitavanja se moraju vrišiti tek onda kada je instrument u potpunosti rasterećen. Nulto se odstupanje računa prema izrazu:

$$f_0 = \max\{|x_{2,0} - x_{1,0}|, |x_{4,0} - x_{3,0}|, |x_{6,0} - x_{5,0}|\}$$

Broj u indeksu mjerne vrijednosti x koja se očitava u nultim točkama označava mjernu seriju M1 do M6.

Ponovljivost b' : Ponovljivost u uvjetima dok je instrument cijelo vrijeme montiran određuje se iz odgovarajućih razlika prema donjim jednadžbama.

$$b'_{up,j} = |(x_{3,j} - x_{3,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|$$

$$b'_{down,j} = |(x_{4,j} - x_{4,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})|$$

$$b'_{mean,j} = \max\{b'_{up,j}, b'_{down,j}\}$$

Gdje u indeksu prvi broj označuje mjerni red (M1...M6), a drugi indeks mjernu točku, vrijednost tlaka u toj točki (u slučaju $j=0$ dobivamo nultu točku).

Obnovljivost b : Obnovljivost u slučaju da je uređaj bio puno puta montiran tokom mjerenja, a da se uvjeti mjerenja nisu mijenjali određena je iz odgovarajućih razlika prema donjim izrazima.

$$b_{up,j} = |(x_{5,j} - x_{5,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})|$$

$$b_{down,j} = |(x_{6,j} - x_{6,0}) - (x_{2,j} - x_{2,0})|$$

$$b_{mean,j} = \max\{b_{up,j}, b_{down,j}\}$$

Gdje u indeksu prvi broj označuje mjerni red (M1...M6), a drugi indeks mjernu točku, vrijednost tlaka u toj točki (u slučaju $j=0$ dobivamo nultu točku).

Histereza h : Kada su srednje vrijednosti iskazane, histereza je određena iz sljedećih razlika.

$$h_{mean,j} = \frac{1}{n} \cdot \{ |(x_{2,j} - x_{1,0}) - (x_{1,j} - x_{1,0})| + |(x_{4,j} - x_{3,0}) - (x_{3,j} - x_{3,0})| + |(x_{6,j} - x_{5,0}) - (x_{5,j} - x_{5,0})| \}$$

Gdje u indeksu prvi broj označuje mjerni red (M1...M6), a drugi indeks mjernu točku, vrijednost tlaka u toj točki (u slučaju $j=0$ dobivamo nultu točku), a n označava broj dovršenih mjernih ciklusa.

Srednja vrijednost \bar{x} : Srednja vrijednost $\bar{x}_{i,j}$ gdje indeks i iznačava up/down (gore/dolje), tj. silazni ili uzlazni mjerni red, a j mjernu točku izračunava se prema izrazu ispod:

$$\bar{x}_{up,j} = \frac{1}{l} \sum_m (x_{m,j} - x_{m,0}) \quad \text{za } m = 1, 3, 5$$

$$\bar{x}_{down,j} = \frac{1}{l} \sum_m (x_{m,j} - x_{(m-1),0}) \quad \text{za } m = 2, 4, 6$$

$$\bar{x}_{mean} = \frac{\bar{x}_{up,j} + \bar{x}_{down,j}}{2}$$

Gdje je varijabla l broj mjernih serija (mjernih redova).

Širina greške (error span) U' : Širina (interval) greške je suma proširene mjerne nesigurnosti ($k=2$) i vrijednosti sustavnog odstupanja. Zbog komponente sustavnog odstupanja, širini greške je pridružena pravokutna razdioba. Ona se određuje prema zahtjevima srednje vrijednosti uzlaznih i silaznih serija mjerenja i srednje vrijednosti.

$$U' = U + |\Delta p|$$

Relativna širina greške (relative error span) W' se definira:

$$W' = W + \left| \frac{\Delta S}{S'} \right|$$

Potvrda o umjeravanju mora sadržavati kolone kao na primjeru ispod.

Tlak p_{standard}	Mjerna veličina na zaslonu mjerila p_{ind}					
	Tip A				mjerjenje s dva spajanja dodatak	
	Tip B					
	Tip C					
	M1 (up)	M2 (down)	M3 (up)	M4 (down)	M5 (up)	M6 (down)
bar, Pascal, ...	bar, Pascal, A, V, mV/V, Hz, ...					
min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.
↓	↓	↑	↓	↑	↓	↑
max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.

Tablica 11: Mjerne vrijednosti

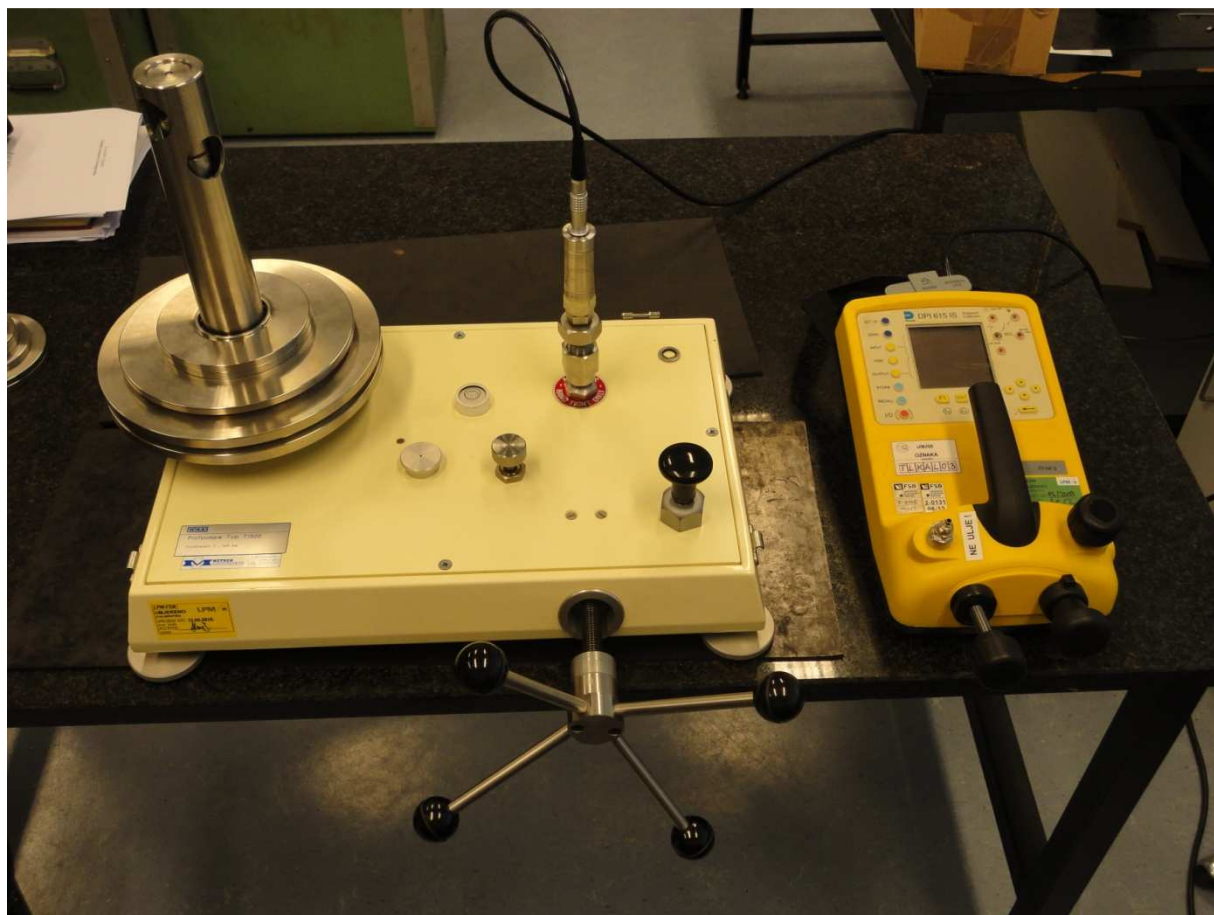
Kolona 1 sadrži vrijednosti tlaka mjerene etalomom. Kolone 2 do 7 sadrže odgovarajuće mjerne vrijednosti koje se očitavaju s umjeravanog mjerila tlaka.

4. LABORATORIJSKA MJERENJA I PRIMJERI UMJERAVANJA

Moj zadatak bio je napraviti proračun za umjeravanje pretvornika tlaka visokog razreda točnosti po preporuci DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges). Zadatak je također sadržavao laboratorijski dio, u kojem je trebalo izvršiti umjeravanje jednog pretvornika tlaka, gdje se kao etalon koristila uljna tlačna vaga, te zatim provesti proračun s dobivenim rezultatima ispitivanja. Za potrebe umjeravanja koristila se tlačna vaga "Pressurements" (TLVAG-08), koristio se sklop do 1400 bara, a umjeravao se pretvornik tlaka s indikacijom do 350 bara (PDCR 2200 – 1939) koje se može vidjeti na slici 26.

Eksperimentalni dio završnog rada obavljen je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Rezultati mjerenja koja su izvedena uklopljeni su u primjer postupka umjeravanja pretvornika tlaka visokog razreda točnosti koji se nalazi u laboratoriju.

Laboratorij za procesna mjerenja nasljednik je Laboratorija za toplinska mjerenja, osnovanog još 1960. godine u sklopu Visoke tehničke škole. U njemu se održavaju vježbe za potrebe nastave preddiplomskog, diplomskog i postdiplomskog studija. Godine 2002. akreditirala ga je njemačka umjerna služba – Deutscher Kalibrierdienst (DKD) te je postao nositelj Državnih etalona temperature i tlaka. Od 2008. godine imenovan je nositeljem Državnog etalona vlažnosti. Osim navedenih etalona, laboratorij djeluje i na području mjeriteljstva protoka i toplinskih svojstava tvari. Temeljni je zadatak laboratorija ostvarenje navedenih mjernih jedinica znanstvenim metodama te osiguranje sljedivosti prema međunarodnim etalonima SI sustava. Laboratorij predstavlja Republiku Hrvatsku u međunarodnim međulaboratorijskim usporedbama te sudjeluje u EURAMET-ovim projektima. Laboratorijska oprema omogućuje postizanje mjeriteljskih sposobnosti laboratorija navedenih u bazi podataka Međunarodnog ureda za utege i mjere (BIPM).



Slika 26: Mjerna linija u LPM-u

4.1. Laboratorijska mjerenja

Tokom mjerenja u laboratoriju zabilježeni su podaci:

Proizvođač (Manufacturer):	DRUCK
Tvornički broj (Serial number):	3088442
Tip (Type):	PDCR 2200 - 1939
Mjerno područje (Measurement range):	0-350
Jedinica tlaka (Pressure unit):	bar
Podjela skale (Resolution):	0,01
Razred točnosti (Accuracy class):	0,025%
Vlasnik mjerila (Owner):	FSB - LPM
Radni etalon (Standard):	TLVAG 08

Uvjeti ispitivanja (Calibration conditions)	
Tepmeratura (Temperature):	24 ±1 °C
Tlak (Pressure):	1009 ± 1 mbar
Rel. vlažnost (Rel. humidity):	41%
Δh:	150 mm

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona	Pokazivanje mjerila			
	p_e	Uzlazno	Silazno	Uzlazno	Silazno
	bar	bar	bar	bar	bar
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	49,9992	49,990	49,990	49,990	49,990
3	100,0063	100,010	100,010	100,000	100,000
4	150,0111	150,040	150,040	150,040	150,040
5	170,0129	170,080	170,060	170,060	170,060
6	200,0148	200,090	200,090	200,100	200,090
7	250,0163	250,140	250,140	250,150	250,140
8	300,0166	300,200	300,190	300,200	300,200
9	350,0096	350,240	350,240	350,240	350,240

Tablica 12: Rezultati mjerenja

Tlak etalona u gornjoj tablici zapravo je onaj efektivni tlak tlačne vage p_e iz poglavlja 2.3.3.

4.2. Primjeri umjeravanja i računalna podrška proračuna

U ovom zadnjem dijelu rada dana su 2 primjera umjeravanja s pripadajućim nesigurnostima, a napravljeni su u računalnom programu Excel. Prvi primjer obrađuje podatke dobivene u laboratoriju (iz poglavlja 4.1.), a u drugom su preuzeti podaci iz priručnika DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges).

4.2.1. Primjer 1

Strana 2 od 3 Potvrde o umjeravanju 2-0019/12-03

1. Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:

Vrsta mjerila: Kalibrator tlaka
 Mjerno područje: 0 do 350 bar
 Razred točnosti: 0,025 %
 Dopusšteno odstupanje: 0,088 bar
 Podjela skale: 0,01 bar
 Jedinica tlaka: bar

2. Podaci o etalonu:

Naziv etalona: Tlačna vaga "Pressurements"
 Interna oznaka: TLVAG-08
 Nesigurnost etalona: $0,5 \times 10^{-4} \times p$
 Sljedivost: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

3. Umjerna procedura:

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip A) proceduri.

4. Uvjeti umjeravanja:

Temperatura okoline: (24±1) °C Tlačni medij: ulje
 Tlak okoline: (1009±1) mbar Pozicija ispitivanog mjerila: vertikalna

5. Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M- p_e bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar	Uzlazno bar	Silazno bar					
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0058
2	49,9992	49,990	49,990	49,990	49,990	49,990	-0,0092	0,0000	0,0000	0,0064
3	100,0063	100,010	100,010	100,000	100,000	100,005	-0,0013	0,0100	0,0000	0,0099
4	150,0111	150,040	150,040	150,040	150,040	150,040	0,0289	0,0000	0,0000	0,0102
5	170,0129	170,080	170,060	170,060	170,060	170,065	0,0521	0,0200	0,0100	0,0171
6	200,0148	200,090	200,090	200,100	200,090	200,093	0,0777	0,0100	0,0050	0,0142
7	250,0163	250,140	250,140	250,150	250,140	250,143	0,1262	0,0100	0,0050	0,0165
8	300,0166	300,200	300,190	300,200	300,200	300,198	0,1809	0,0100	0,0050	0,0189
9	350,0096	350,240	350,240	350,240	350,240	350,240	0,2304	0,0000	0,0000	0,0205
10						0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0058
11						0,000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0058

6. Mjerna nesigurnost:

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

7. Označavanje instrumenta:

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.

okoline	1
Nesigurnost tlaka	1
Gustoca fluida	855
Nesigurnost razlike visine	0,005
Težno ubrzanje	9,80621

Točka 1:		$p_1 = 0,000$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0	0	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00000839
$U_1 =$					0,00579426

Točka 2		$p_2 = 49,999$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00249996	0,00249996	0,5	0,00000156
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00109998	0,00109998	0,57737	0,00000040
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00001036
$U_2 =$					0,00643713

Točka 3		$p_3 = 100,006$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00500031	0,00500031	0,5	0,00000625
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00220014	0,00220014	0,57737	0,00000161
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,010	0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00002459
$U_3 =$					0,00991818

Točka 4		$p_4 = 150,011$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00750056	0,00750056	0,5	0,00001406
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00330025	0,00330025	0,57737	0,00000363
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00002609
$U_4 =$					0,01021543

Točka 5		$p_5 = 170,013$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00850065	0,00850065	0,5	0,00001807
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00374028	0,00374028	0,57737	0,00000466
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,020	0,02	0,2887	0,00003334
Histereza	iz mjerenja	0,010	0,010	0,2887	0,00000833
suma u^2					0,00007280
$U_5 =$					0,01706411

Točka 6		$p_6 = 200,015$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,01000074	0,01000074	0,5	0,00002500
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00440033	0,00440033	0,57737	0,00000645
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultoeke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,010	0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
suma u^2					0,00005027
$U_6 =$					0,01418030

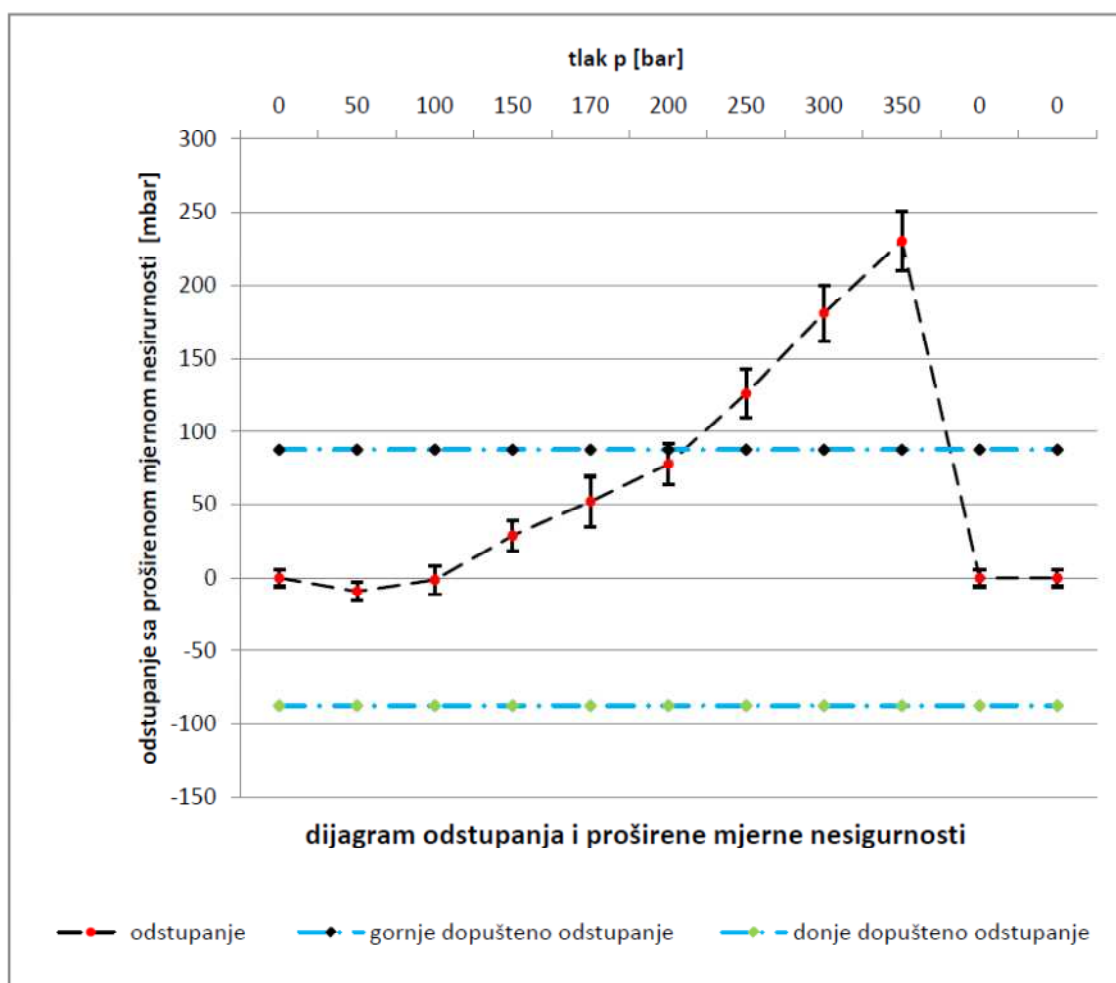
Točka 7		$p_7 = 250,016$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,01250082	0,01250082	0,5	0,00003907
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00550036	0,00550036	0,57737	0,00001009
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultoeke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,010	0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
suma u^2					0,00006796
$U_7 =$					0,01648815

Točka 8		$p_8 = 300,017$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,01500083	0,01500083	0,5	0,00005626
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00660037	0,00660037	0,57737	0,00001452
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultoeke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,010	0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	iz mjerenja	0,005	0,005	0,2887	0,00000208
suma u^2					0,00008959
$U_8 =$					0,01893047

Točka 9		$p_9 = 350,010$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,01750048	0,01750048	0,5	0,00007657
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00770021	0,00770021	0,57737	0,00001977
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultoeke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00010473
$U_9 =$					0,02046713

Točka 10		$p_{10} = 0,000$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0	0	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultoeke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00000839
$U_{10} =$					0,00579426

Točka 11		$p_{11} = 0,000$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0	0	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultoeke	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
Ponovljivost	iz mjerenja	0,000	0	0,2887	0,00000000
Histereza	iz mjerenja	0,000	0,000	0,2887	0,00000000
suma u^2					0,00000839
$U_{10} =$					0,00579426



Slika 27: Dijagram odstupanja i proširene mjerne nesigurnosti (primjer 1)

4.2.2. Primjer 2

Podaci su preuzeti iz priručnika DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges). Kako je tamo umjeravan transponder s električnim izlazom signala, postupak umjeravanja i procjene mjerne nesigurnosti malo se razlikuje od postupka umjeravanja pretvornika tlaka. S obzirom na to da je cilj ovog rada postupak umjeravanja pretvornika tlaka, smatrat ćemo da preuzeti podaci odgovaraju pretvorniku tlaka visokog razreda točnosti. Kako transponder kao izlazni signal daje električnu veličinu, prvo je treba pretvoriti u izlaznu veličinu tlaka kakvu daje pretvornik. U nedostatku bolje informacije pretpostavit ćemo linearnu karakteristiku instrumenta. Preračunavanje se također vršilo u računalnom programu Excel.

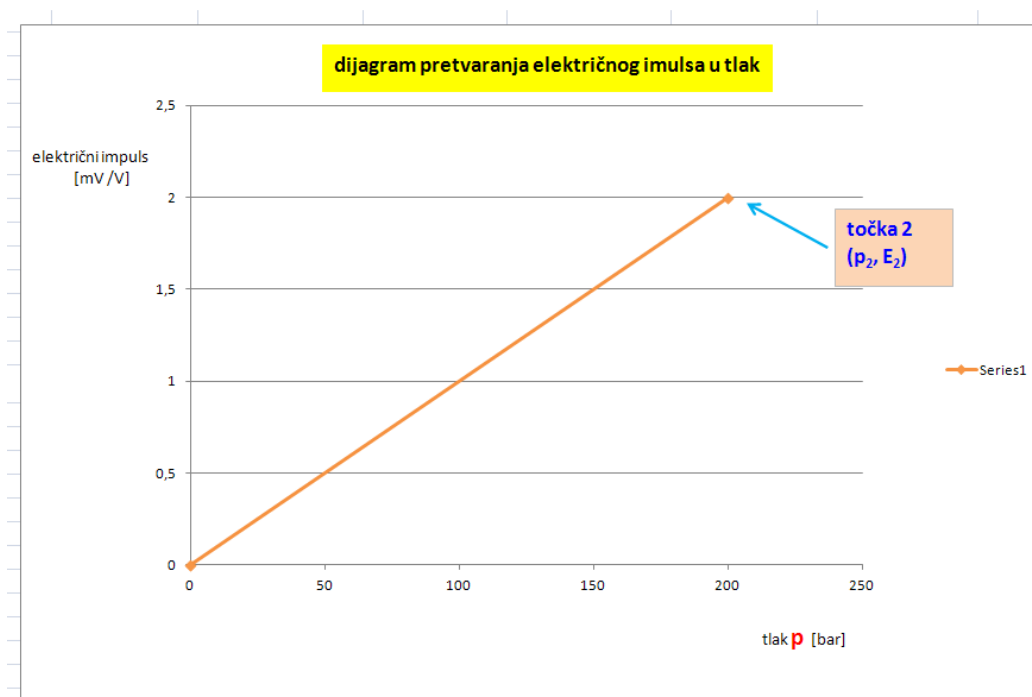
Formula pretvorbe:

$$p = \frac{p_2}{E_2} \cdot E$$

p – preračunati tlak koji pokazuje pretvornik

E – električni impuls koji pokazuje transponder

p _{stand} [bar]	transponder
0	0
200	2



Slika 28: Dijagram pretvaranja električnog impulsa u tlak

M1			M2			M3			M4		
p _{stand} [bar]	el. Impuls [mV/V]	tlak pretvornika [bar]	el. Impuls [mV/V]	tlak pretvornika [bar]	el. Impuls [mV/V]	tlak pretvornika [bar]	el. Impuls [mV/V]	tlak pretvornika [bar]			
0	0	0	-0,00003	-0,003	0	0	0	0			
20,01	0,20009	20,009	0,20026	20,026	0,20019	20,019	0,20033	20,033			
40,022	0,40026	40,026	0,40063	40,063	0,40032	40,032	0,40067	40,067			
60,033	0,60041	60,041	0,60094	60,094	0,60049	60,049	0,60097	60,097			
80,045	0,80053	80,053	0,80118	80,118	0,80062	80,062	0,8012	80,12			
100,056	1,00063	100,063	1,00139	100,139	1,00072	100,072	1,00135	100,135			
120,068	1,20074	120,074	1,20149	120,149	1,2008	120,08	1,20141	120,141			
140,079	1,4008	140,08	1,40158	140,158	1,40089	140,089	1,4015	140,15			
160,091	1,60082	160,082	1,60157	160,157	1,60091	160,091	1,60148	160,148			
180,102	1,80084	180,084	1,80148	180,148	1,80097	180,097	1,80135	180,135			
200,113	2,00079	200,079	2,001	200,1	2,00088	200,088	2,00114	200,114			

Tablica 13: Tablica pretvaranja električnog impulsa u tlak

S tim podacima o tlaku etalona i tlaku očitavanja ulazi se u proračun. Postupak umjeravanja pretvornika prikazan je na sljedećih nekoliko stranica.

Strana 2 od 3 Potvrde o umjeravanju 2-0019/12-03

1.Podaci o umjeravanom mjerilu tlaka:

Vrsta mjerila: Kalibrator tlaka
 Mjerno područje: 0 do 200 bar
 Razred točnosti: 0,025 %
 Dopušteno odstupanje: 0,050 bar
 Podjela skale: 0,01 bar
 Jedinica tlaka: bar

2.Podaci o etalonu:

Naziv etalona: Tlačna vaga "Pressurements"
 Interna oznaka: TLVAG-08
 Nesigurnost etalona: $0,5 \times 10^{-4} \times p$
 Sljedivost: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

3.Umjerena procedura:

Instrument je umjeren pomoću etalonskih mjernih sustava Laboratorija za procesna mjerenja. Korištena je interna procedura umjeravanja metodom usporedbe CPTL-02 temeljena na DKD-R6-1 (Tip A) proceduri.

4.Uvjeti umjeravanja:

Temperatura okoline: $(24 \pm 1) ^\circ\text{C}$ Tlačni medij: ulje
 Tlak okoline: $(1009, \pm 1) \text{ mbar}$ Pozicija ispitivanog mjerila: vertikalna

5.Rezultati umjeravanja (Pod gore navedenim uvjetima):

Broj ispitnih točaka	Tlak etalona p_e bar	Pokazivanje mjerila				Srednja vrijednost M bar	Odstupanje M- p_e bar	Ponovljivost b bar	Histereza h bar	Nesigurnost umjeravanja U bar
		Uzlazno bar	Silazno bar	Uzlazno bar	Silazno bar					
1	0,000	0,000	-0,003	0,000	0,000	-0,001	-0,0008	0,0030	0,0015	0,0064
2	20,0100	20,009	20,026	20,019	20,033	20,022	0,0117	0,0100	0,0155	0,0123
3	40,0220	40,026	40,063	40,032	40,067	40,047	0,0250	0,0060	0,0360	0,0220
4	60,0330	60,041	60,094	60,049	60,097	60,070	0,0373	0,0080	0,0505	0,0303
5	80,0450	80,053	80,118	80,062	80,120	80,088	0,0433	0,0090	0,0615	0,0367
6	100,0560	100,063	100,139	100,072	100,135	100,102	0,0463	0,0090	0,0695	0,0413
7	120,0680	120,074	120,149	120,080	120,141	120,111	0,0430	0,0080	0,0680	0,0406
8	140,0790	140,080	140,158	140,089	140,150	140,119	0,0403	0,0090	0,0695	0,0417
9	160,0910	160,082	160,157	160,091	160,148	160,120	0,0285	0,0090	0,0660	0,0400
10	180,1020	180,084	180,148	180,097	180,135	180,116	0,0140	0,0130	0,0510	0,0326
11	200,1130	200,079	200,100	200,088	200,114	200,095	-0,0178	0,0140	0,0235	0,0203

6.Mjerna nesigurnost:

Nesigurnost navedena u tablici je proširena mjerna nesigurnost koja odgovara dvostrukom standardnom odstupanju ($k=2$), tj. granice ukupne nesigurnosti odgovaraju razini pouzdanosti od 95%.

7.Označavanje instrumenta:

Umjerna oznaka naljepljena je na kućište instrumenta.

okoline	1
Nesigurnost tlaka	1
Gustoca fluida	855
Nesigurnost razlike visine	0,005
Težno ubrzanje	9,80621

Točka 1:		$p_1 = 0,000$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0	0	0,57737	0,00000000
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Histereza	iz mjerenja	0,002	0,002	0,2887	0,00000019
suma u^2					0,00001008
$U_1 =$					0,00635016

Točka 2		$p_2 = 20,010$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0010005	0,0010005	0,5	0,00000025
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00044022	0,00044022	0,57737	0,00000006
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,010	0,01	0,2887	0,00000833
Histereza	iz mjerenja	0,015	0,015	0,2887	0,00002002
suma u^2					0,00003782
$U_2 =$					0,01229917

Točka 3		$p_3 = 40,022$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0020011	0,0020011	0,5	0,00000100
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00088048	0,00088048	0,57737	0,00000026
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,006	0,006	0,2887	0,00000300
Histereza	iz mjerenja	0,036	0,036	0,2887	0,00010802
suma u^2					0,00012142
$U_3 =$					0,02203834

Točka 4		$p_4 = 60,033$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00300165	0,00300165	0,5	0,00000225
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00132073	0,00132073	0,57737	0,00000058
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,008	0,008	0,2887	0,00000533
Histereza	iz mjerenja	0,051	0,051	0,2887	0,00021256
suma u^2					0,00022987
$U_4 =$					0,03032287

Točka 5		$p_5 = 80,045$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00400225	0,00400225	0,5	0,00000400
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00176099	0,00176099	0,57737	0,00000103
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultočke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,009	0,009	0,2887	0,00000675
Histereza	iz mjerenja	0,062	0,062	0,2887	0,00031524
suma u^2					0,00033617
$U_5 =$					0,03667014

Točka 6		$p_6 = 100,056$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0050028	0,0050028	0,5	0,00000626
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00220123	0,00220123	0,57737	0,00000162
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,009	0,009	0,2887	0,00000675
Histereza	iz mjerenja	0,069	0,069	0,2887	0,00040259
suma u^2					0,00042636
$U_6 =$					0,04129683

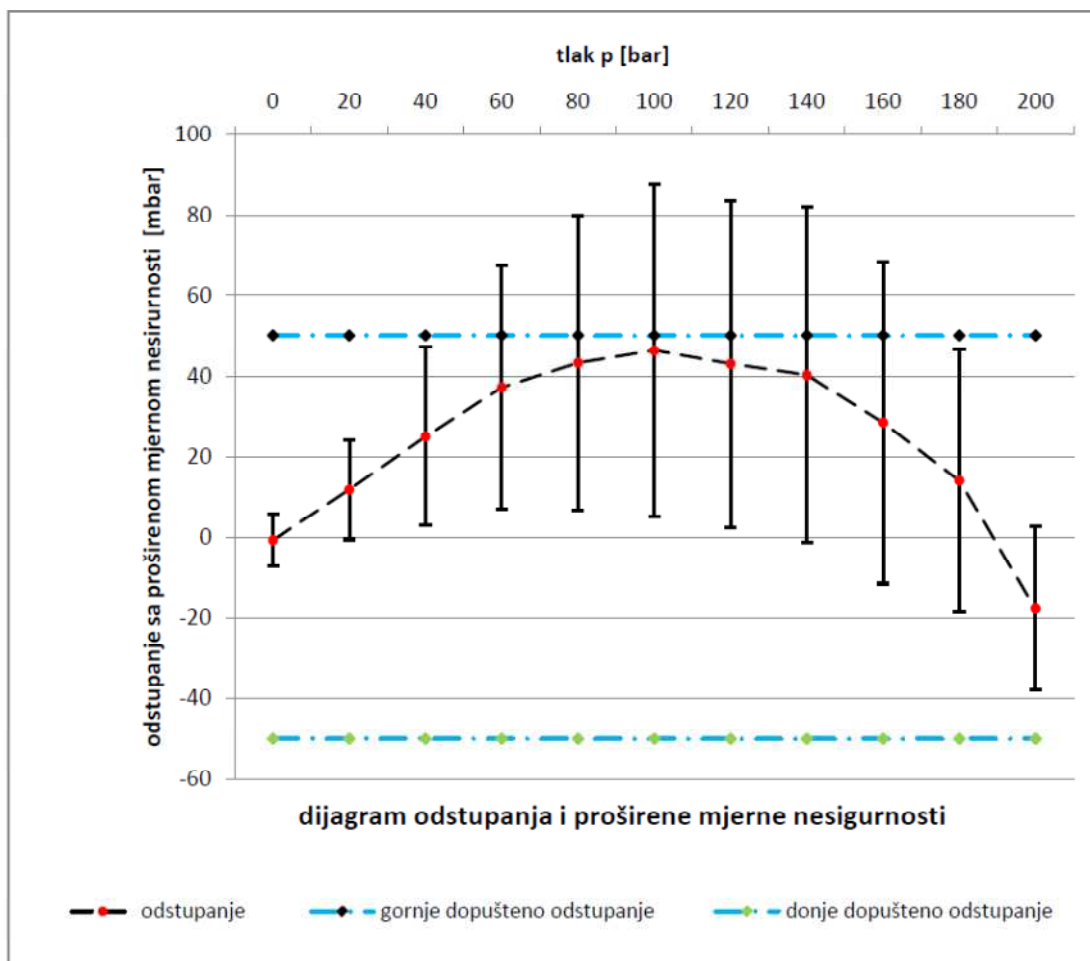
Točka 7		$p_7 = 120,068$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0060034	0,0060034	0,5	0,00000901
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,0026415	0,0026415	0,57737	0,00000233
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,008	0,008	0,2887	0,00000533
Histereza	iz mjerenja	0,068	0,068	0,2887	0,00038540
suma u^2					0,00041121
$U_7 =$					0,04055681

Točka 8		$p_8 = 140,079$			
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00700395	0,00700395	0,5	0,00001226
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00308174	0,00308174	0,57737	0,00000317
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,009	0,009	0,2887	0,00000675
Histereza	iz mjerenja	0,070	0,070	0,2887	0,00040259
suma u^2					0,00043391
$U_8 =$					0,04166123

Točka 9 $p_9 = 160,091$					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,00800455	0,00800455	0,5	0,00001602
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,003522	0,003522	0,57737	0,00000414
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,009	0,009	0,2887	0,00000675
Histereza	iz mjerenja	0,066	0,066	0,2887	0,00036306
suma u^2					0,00039911
$U_9 =$					0,03995550

Točka 10 $p_{10} = 180,102$					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,0090051	0,0090051	0,5	0,00002027
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00396224	0,00396224	0,57737	0,00000523
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,013	0,013	0,2887	0,00001409
Histereza	iz mjerenja	0,051	0,051	0,2887	0,00021679
suma u^2					0,00026552
$U_{10} =$					0,03258975

Točka 11 $p_{11} = 200,113$					
Utjecajna veličina	Izvor	Podaci	Vrijednost u bar/mbar	Faktor	u^2 u bar ²
Etalon	iz umjernice	0,01000565	0,01000565	0,5	0,00002503
Etalon pod uvjetima ispitivanja	iz mjerenja	0,00440249	0,00440249	0,57737	0,00000646
Razlika visina	iz mjerenja	41,9215478	0,00041922	0,57737	0,00000006
Pojačalo	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Multimetar	iz umjernice	0	0	0,5	0,00000000
Razlučljivost (kod opružnih)	1/5 * podjela	0	0	0,57737	0,00000000
Razlučljivost (kod električnih)	Indikacija	0,01	0,01	0,2887	0,00000833
Odstupanje od nultocke	iz mjerenja	0,003	0,003	0,2887	0,00000075
Ponovljivost	iz mjerenja	0,014	0,014	0,2887	0,00001634
Histereza	iz mjerenja	0,024	0,024	0,2887	0,00004603
suma u^2					0,00010300
$U_{11} =$					0,02029756



Slika 29: Dijagram odstupanja i proširene mjerne nesigurnosti (primjer 2)

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada prvenstveno je bio prikazati postupak umjeravanja mjerila tlaka po preporuci DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges) s posebnim naglaskom na umjeravanje pretvornika tlaka visokog razreda točnosti po A tipu procedure umjeravanja te prikazani postupak računalom podržati za umjeravanje pretvornika tlaka.

U sklopu rada provedeno je umjeravanje pretvornika tlaka (PDCR 2200 – 1939) indikacije do 350 bara na etalonskoj tlačnoj vagi "Pressurements" (TLVAG-08) u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a dobiveni rezultati obrađeni su u računalnom programu Excel.

U uvodnom dijelu rada prikazan je općeniti postupak određivanja mjerne nesigurnosti ISO-GUM metodom te je, također u sklopu uvodnog dijela, riješen jedan općeniti primjer procjene mjerne nesigurnosti.

Dobiveni rezultati pokazuju da se postupak umjeravanja može uspješno provoditi primjenom računala.

LITERATURA

- [1] skupina autora, Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, NPL, London, 1998.
- [2] DKD-R6-1 Guideline (Calibration of Pressure Gauges), Edition 01/2003
- [3] D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici), FSB-LPM, 2010./2011.
- [4] D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: Vježbe iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici), FSB-LPM, 2010./2011.
- [5] V. Mudronja, B. Runje: Predavanja iz kolegija Mjeriteljstvo, Laboratorij za precizna mjerenja dužine (LFSB), 2011./2012.
- [6] EURAMET/cg-17/v.01 Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers, July 2007
- [7] G. Buonanno, G. Ficco, G. Giovinco, G. Molinar: Ten years of experience in modelling pressure balances in liquid media up to few Gpa, Università degli Studi di Cassino, Cassino, 2007.
- [8] S. L. Lewis, G. N. Peggs: The Pressure Balance: A Practical Guide to its Use, Ed. 2, HMSO, London, 1992.
- [9] M. Vuković: Metrologija ukratko, DZNM, Zagreb, 2000.
- [10] S. Singer: Predavanja iz matematike 3, Vjerojatnost i statistika, Zagreb, 2009.
- [11] A. Dulčić: Predavanja iz opće fizike 4, Toplina i termodinamika, 2009./2010., PMF, FIZIČKI ODSJEK
- [12] D. K. Sunko: Statistička fizika i termodinamika (bilješke s predavanja), 2008., PMF, FIZIČKI ODSJEK
- [13] Ivo Batistić: Kinetička teorija plinova, predavanja 2005/2006, PMF, Fizički odsjek
- [14] T. Andreis, M. Plavčić, N. Simić: Fizika 2, PROFIL, Zagreb, 2004.
- [15] A. Galović: Termodinamika 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2007.
- [16] M. Paić: Toplina i termodinamika, Školska knjiga, Zagreb, 1994.
- [17] Z. Virag, M. Šavar: Mehanika fluida 1, predavanja 2009./2010., FSB